

И. Н. КАРЕЛИНА, С. Н. СКРИПКО, В. А. ХРОЛИНА

**ОСНОВНЫЕ
МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ
В МУСКОВИТЕ
И ВЛИЯНИЕ ИХ
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «КАРЕЛИЯ» ПЕТРОЗАВОДСК

И. Н. Карелина, С. Н. Скрипко, В. А. Хролина

ОСНОВНЫЕ
МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ
В МУСКОВИТЕ
И ВЛИЯНИЕ ИХ
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Научный редактор
кандидат геолого-минералогических наук
Б. Я. Алексеев

Карелина И. Н., Скрипко С. Н., Хролина В. А.
К 122 Основные минеральные включения в мусковите
и влияние их на электрические свойства. Петрозаводск, «Карелия», 1976.

88 стр., рис. 37, табл. 11, лит. 75 назв.

Мусковит с включениями, широко распространенный в пегматитовых жилах северной Карелии, изучался с точки зрения влияния этих включений на качество мусковита как диэлектрика. В работе приводится характеристика минералов-включений: сульфидов, окислов и гидроокислов железа, силикатов и газовых. Дается их описание, форма проявления и расположения в кристалле. Рассматривается распространение мусковита с включениями в некоторых пегматитовых жилах. Показано влияние включений на электрическую прочность, напряжение поверхностного разряда, диэлектрические потери, удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость мусковита.

Монография представляет интерес для минералогов, физиков и технологов.

К $\frac{0292-080}{M 127(03)-76}$



ВВЕДЕНИЕ

Мусковит с включениями широко распространен в пегматитах Чупино-Лоухского района. В промышленном сырце, добываемом в настоящее время на рудниках Тэдино и Малиновая Варакка, содержится до 35—83% подборов с включениями (от общего количества подборов). Промышленная ценность мусковита, его применение в радио- и электротехнике определяется наряду с другими признаками составом минеральных включений и содержанием их включений на пластинке мусковита.

Исследователи пегматитов Б. Е. Карский и Г. П. Луговской [30], Е. Д. Белянкина и др. [1], Э. Я. Гурьева [24], А. С. Никаноров [46], Г. П. Сафронова [54, 55], К. А. Шуркин и др. [71] наряду с мусковитом изучали и его минеральные включения, но с разной степенью детальности. Большое внимание уделено описанию формы и окраски включений, расположению относительно кристаллографических форм вмещающего мусковита, взаимоотношению с мусковитом и т. п.; высказаны мнения относительно природы минеральных включений. Б. Е. Карский и Г. П. Луговской характеризуют многочисленные включения в мусковите в виде:

1. Объемных (протыкающих), которые при выпадении оставляют в мусковите сквозные отверстия (биотит, кварц, апатит и др.);

2. Пластинчато-объемных, расположенных в плоскости спайности слюды и легко из нее извлекаемых (кальцит, кварц и др.);

3. Пластинчатых, весьма тонких, трудно извлекаемых включений (биотит, магнетит, гематит, гидроокислы железа, сульфиды, хлорит).

По фазовому состоянию в слюде выделяют твердые (вышеперечисленные), газовые и редко встречающиеся жидкие включения.

Особый интерес при исследовании влияния включений на электрические свойства мусковита вызывают пластинчатые

и плечные минеральные включения и газ, сравнительно часто встречающиеся в мусковите пегматитовых жил Карелии. Эти включения, именуемые в ГОСТах [13, 16, 18, 19, 75] как «пятна», представляют большие трудности в определении качества мусковита.

Много работ посвящено изучению биотита в мусковите [25, 30, 45, 46, 50], сульфидов и магнетита [24, 55, 74], гидроокислов железа и хлорита [21, 26, 30, 31, 36]. Диагностика рудных включений в мусковите в ранние годы проводилась по внешним минералогическим особенностям без применения точных методов, например рентгеноскопии. По этой причине некоторые исследователи допускали ошибку в определении включений пирротина [24, 30, 35]. Нередко исследование включений проводилось на мусковите, характеризующем в целом пегматитоносный район (Чупино-Лоухский или Мамский), в крайнем случае, месторождение, т. е. вне конкретной геологической обстановки, в которой образовался мусковит. Особенно это характерно для исследователей физико-электрических свойств мусковита с включениями [7, 12, 52].

Изучением влияния включений на технологические и физико-электрические свойства мусковита занимались М. М. Михайлов [42], А. В. Толвинская и М. М. Михайлов [64], А. И. Сулоев и Е. И. Самойлова [62], Е. К. Лашев [35], А. В. Мальцев [38, 39, 40], М. С. Лейзерзон и др. [36, 37], К. А. Водопьянов, И. Г. Ворожцова [7], Г. П. Федосеев [65, 66], Н. В. Дубенская [25] и другие. Работы этих авторов проводились на разных образцах слюды при различных условиях, поэтому трудно составить общее мнение о влиянии включений на диэлектрик. Зависимость качества мусковита от таких видов включений как пирротин, пирит и хлорит изучена недостаточно.

Действующие ГОСТы и технические условия на изделия из слюды и полуфабрикаты имеют явные противоречия. Неточности формулировок в определении качества мусковита приводят к неправильной оценке их специалистами, необоснованным забраковкам изделий или полуфабрикатов и снижению выходов данных изделий из сырья. Классификация слюды по маркам и сортам, основанная на визуальной количественной оценке содержания включений, не согласуется с аналогичной классификацией по электрическим показателям [17, 18].

Представленные в работе материалы основаны на исследованиях мусковита пегматитовых жил месторождений Тэдино и Малиновая Варакка северной Карелии, приуроченных к беломорскому комплексу гнейсов архейского возраста. В геологическом строении этого района принимают участие в основном метаморфические породы: светло-серые биотитовые гнейсы, амфиболо-биотитовые гнейсы и амфиболиты, биотитовые, гранато-биотитовые и дистено-гранато-биотитовые гнейсы. Пегма-

титы района — наиболее молодые из интрузивных образований и представляют собой секущие, крутопадающие жильные тела.

Авторы данной работы исследовали мусковит пегматитовых жил № 141-а, 152, 154, 183 месторождения Малиновая Варакка (II—IV типов по классификации Л. Л. Гродницкого [22]), непосредственно залегающих среди дистено-гранато-биотитовых, гранато-биотитовых гнейсов X—XI горизонтов чупинской свиты (по стратиграфической схеме Е. П. Чуйкиной). Кроме того, исследовался мусковит пегматитовых жил № 172, 180, 186 месторождения Тэдино, залегающих среди мелкозернистых, слабо или отчетливо рассланцованных дистено-гранато-биотитовых гнейсов V горизонта указанной свиты.

Для выделения типов пегматитовых жил, как отмечалось, авторы использовали наиболее современную классификацию Л. Л. Гродницкого и считают необходимым назвать основные структурно-минеральные комплексы, слагающие типы пегматитов [22].

I тип. Массивные тела. Плагноклазовый пегматит неясно-графической структуры с таблитчатым биотитом, реже плагноклазовый пегматит апографической структуры; кварц-мусковитовый комплекс в виде мелких единичных гнезд; жилы практической ценности не имеют.

II тип. Зональные тела, сложенные вышеуказанными структурно-минеральными комплексами в пространственной совокупности с плагноклазовым пегматитом пегматоидной и блоковой структур с мусковитом, плагноклазовым пегматитом петельчатой и графической структур. Широко развит кварц-мусковитовый комплекс, блоковый кварц.

III тип. Зональные тела, сложенные структурно-минеральными комплексами II типа жил; кроме того, микроклиновым пегматитом пегматоидной и блоковой, графической, апографической и петельчатой структур.

IV тип. Участково-зональные пегматиты. Структурно-минеральные комплексы III типа жил; кроме того, микроклиновый и плагноклазовый пегматиты блоково-грубографической структуры с листоватым и лейстовым биотитом. Наибольшее промышленное значение имеют пегматиты II и III типов.

Из различных структурно-минеральных зон пегматитовых жил II—IV типов месторождений Малиновая Варакка и Тэдино были исследованы 422 пробы мусковита кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности. Кроме того, рассмотрены и испытаны таблички слюды из промышленного сырья Петрозаводской слюдяной фабрики (месторождение Хетоламбино, Карельское). Физические исследования проведены примерно на 4000 образцах в лаборатории исследования диэлектриков Института геологии и 550 образцах в виде конденсаторных блоков в заводских условиях.

В измерении физических свойств слюды принимали участие сотрудники института В. В. Кизик, Т. А. Позднякова, Н. А. Салтыкова. Рентгеновские анализы выполнены В. П. Мартыновым, Ю. П. Мельниковым (Кольский филиал АН СССР), спектральные анализы (ИКС) — С. В. Кузнецовым.

По рукописи были сделаны замечания Л. Л. Гродницким, М. И. Голодом, А. Б. Наливкиным, В. М. Покровской, Ф. А. Тюрюхановым, Г. П. Федосеевым. Всем перечисленным лицам, оказавшим большую помощь в выполнении работы и составлении книги, авторы выражают свою искреннюю благодарность.

Глава I

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МУСКОВИТА ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МИНЕРАЛОВ-ВКЛЮЧЕНИЙ

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ-ВКЛЮЧЕНИЙ

Минеральные включения в мусковите по своей структуре, химическому составу, минералогическим, механическим и электрическим свойствам резко отличаются от вмещающего их мусковита (сульфиды, окислы, гидроокислы железа) или довольно близки к нему (листоватые силикаты). В табл. 1 и 2 приведены кристалло-химические формулы, типы связей, физические характеристики минералов-включений по данным Фр. Берча [3], А. Г. Бетехтина [4], Е. В. Рожковой и Л. В. Проскуровского [53], А. С. Поваренных [49], В. Н. Корбановой [32], В. Т. Ренне [51], Е. К. Лазаренко [34], Д. Н. Хитарова [69] и экспериментальные данные лаборатории Института геологии.

Рудные минералы-включения (сульфиды, окислы и гидроокислы железа) представлены полупроводниками, обладающими низким удельным сопротивлением, большими значениями диэлектрической проницаемости, плотности, хрупкости и твердости по сравнению с силикатами. Пирротин и магнетит являются наиболее хорошими проводниками электрического тока, а пирит — слабым проводником при химическом составе, близком к теоретическому, и хорошим — при недостатке серы. Гематит и гидроокислы железа слабо проводят электрический ток по сравнению с магнетитом и сульфидами.

Нерудные минералы-включения, представленные биотитом и хлоритом, являются диэлектриками, но по сравнению с мусковитом обладают более низким (на два порядка) удельным сопротивлением, более высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь.

Кроме перечисленных твердых минералов-включений, в мусковите широко распространены газовые включения (метан, азот, углекислый газ и др.). Они относятся к диэлектрикам, обладающим более высокими, чем мусковит, значениями удельного объемного сопротивления (от 10^{16} до 10^{20} Ом·см), более низкими значениями диэлектрической проницаемости (1) и тангенса угла диэлектрических потерь (менее 10^{-5}).

Характеристика минералов-

Класс	Типы связи	Наименование минералов	Кристаллохимическая формула
Сернистые и им подобные соединения	Преимущественно ковалентная и переходная от ковалентной к ионной и металлической	Пирит—серный или железный колчедан	$\text{Fe [S}_2\text{]}$
		Пирротин — магнитный колчедан	$\text{Fe}_{1-n} \text{Fe}^{1/2}_n \text{S}$
Простые и сложные окислы	Ионная	Магнетит — магнитный железняк	$(\text{Fe}_{1-n}^{2+} \text{Fe}_{2/3n}^{3+}) \text{Fe}_2 \text{O}_4$
		Гематит—красный железняк	$\text{Fe}_2 \text{O}_3$
Гидроокислы железа	Преимущественно ионная	Лимонит и гетит	$\text{FeO(OH)} \cdot n \text{H}_2\text{O}$ и FeO (OH)
Силикаты	Ковалентная и ионная, преобладает существенно ионная	Мусковит	$\text{KAl}_2[\text{OH}]_2 \cdot [\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
		Биотит	$\text{K(Mg, Fe)}_3 \cdot [\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] \cdot (\text{OH, F})_2$
		Хлориты	$(\text{Mg, Fe})_{4,5} \text{Al}_{1,5} \cdot (\text{OH})_8 [\text{Al}_{1,5} \text{Si}_{2,5} \text{O}_{10}]$

Таблица 1

включений в мусковите

Отношение к химическим реакциям	Цвет	Облик и габитус кристаллов
Стойкий к HCl. В HNO ₃ растворяется в тонком порошке, выделяя S	Соломенно-желтый с бурой, пестрой и латуно-желтой побежалостью	Изометрический, кубический, пентагон-додекаэдрический, реже октаэдрический
Разлагается в HCl с выделением H ₂ S. В HNO ₃ разлагается с трудом	Бронзово-желтый с бурой побежалостью	Таблитчатый, реже столбчатый, дипирамидальный, гексагональный в поперечном сечении
Растворяется в HCl только в порошке	Железно-черный с синеватой побежалостью	Изометрический, октаэдрический, реже додекаэдрический, очень редко кубический
Медленно растворяется в концентрированной HCl	Землистых разностей—ярко-красный; кристаллический—железно-черный с синеватой побежалостью	Таблитчатый, пластинчатый, гексагональный в поперечном сечении
Растворяется в HCl и H ₂ SO ₄	Темно-бурый до черного, порошковатый—светлый желто-бурый с красноватым оттенком	Игольчатый, обычно натечные скрытокристал. агрегаты, оолиты
В кислотах не растворяется	В тонких листочках бесцветный при толщине более 0,10 мм, коричневый, коричнево-рубиновый	Таблитчатый, гексагональный в поперечном сечении
В концентр. H ₂ SO ₄ разлагается с осаждением кремнезема (белого скелета)	Коричневый, бурый до черного	Таблитчатый, листоватый, псевдогексагональный в поперечном сечении
Растворяется в H ₂ SO ₄	Зеленый с разными оттенками	Таблитчатый, пластинчатый псевдогексагональный в поперечном сечении, агрегаты нередко чешуйчатые

Физические свойства

Наименование минерала	Механические свойства			
	Плотность, г/см ³	Хрупкость	Твердость	
			по Моосу	кг/мм ²
Пирротин	4,6—4,7	Хрупкий	3,5—4,5	268,6—353,8
Пирит	4,9—5,2	То же	6,0—6,5	1252—1314
Магнетит	4,9—5,2	То же	5,5—6,0	535—695
Гематит	5,0—5,2	То же	—	920—1062
Гетит	4,0—4,4	—	1—4	537,2—572,0
Лимонит	3,3—4,0	—	1—4	—
Мусковит	2,8—3,1	Гибкий, упругий	2—3	177—215*
Биотит	3,0—3,1	То же	2—3	246*
Хлориты	2,6—3,3	Гибкий, не упругий	2—3	—

* Экспериментальные данные лаборатории.

Поскольку минералы-включения отличаются по свойствам от вмещающего их минерала, то свойства такого мусковита в электрическом поле будут иными по сравнению с чистым мусковитом.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУСКОВИТА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Диэлектрическая проницаемость

Мусковит относится к группе слоистых силикатов. Основным элементом структуры является трехслойный пакет, состоящий из двух тетраэдрических слоев и одного внутреннего октаэдрического. В этом минерале действуют ковалентная и ионная типы связи.

В реальном диэлектрике поляризация является результирующей нескольких различных поляризационных процессов: ионного смещения, структурной и ионно-релаксационной поляризации. Виды поляризации, электропроводности, диэлектрических потерь в зависимости от структуры, химического состава диэлектрика и внешних факторов (давления, температуры, частоты электрического тока и др.) рассматривались большой группой ученых: Г. И. Скани [57, 59, 60], К. А. Водопьяновым, И. Г. Ворожцовым [7, 11], Г. Фрелихом [68], Н. П. Бого-

минералов-включений

Магнитная восприимчивость, CGSM	Электрические свойства			
	Диэлектр. проницаем.	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Удельное поверхностное сопротивление, Ом	Тангенс угла диэлектрических потерь, $f=1$ кГц
2500·10 ⁻⁶ *	> 81	10 ⁻³ —10 ⁻²	—	—
1—2·10 ⁻⁶ *	>33,7 и <81	10 ⁻² —10	—	—
3000·10 ⁻⁶ *	>33,7 и <81	10 ² —10 ⁻¹	—	—
70—280·10 ⁻⁶	25	10 ² —10 ⁷	—	—
—	11,7	—	—	—
25·10 ⁻⁶	3,2	10 ⁹	4·10 ⁷ *	—
0,7·10 ⁻⁶ *	6,79*	6,9·10 ¹⁵ *	10 ¹³ *	1,5—3,0·10 ⁻⁴ *
40 ÷ 52·10 ⁻⁶	5,4—6,4*	5,2·10 ¹³ *	1,8·10 ¹² *	5,8·10 ⁻³ —1,5·10 ⁻²
18·10 ⁻⁶ *	10,3	—	—	—
—	—	—	—	—

родичким [5], М. С. Мециком [41], В. Т. Ренне [51] и другими.

Возникновение того или иного типа поляризации определяется химико-физическими свойствами вещества и диапазоном частот, поскольку время установления для различных видов поляризаций неодинаково.

Время установления поляризации ионного смещения достаточно мало, чтобы в рабочей области частот диэлектрическая проницаемость (ϵ) не зависела от частоты. Повышение температуры приводит к увеличению поляризуемости ионов в связи с ослаблением упругих связей между ионами в кристаллической решетке при тепловом расширении вещества, поэтому ϵ слюды увеличивается. Диэлектрик имеет положительный температурный коэффициент емкости (ТКЕ).

Ионно-релаксационная поляризация происходит за счет слабо закрепленных ионов примеси при неплотной упаковке кристаллической решетки и нарушения закономерного роста кристалла при его образовании, в частности за счет кристаллизационной воды. Поляризуемость, связанная с ионно-релаксационной поляризацией, зависит от температуры. С увеличением ее наблюдается рост ϵ до определенного максимума, а затем уменьшение, вызванное облегчением переброса ионов электрическим полем.

Структурная поляризация возникает в неоднородных материалах, при наличии в веществе проводящих и полупроводящих включений. При низких температурах и воздействии электрического поля наблюдается значительное изменение тока со временем, связанное с распределением электрического поля в диэлектрике. Как указывает Г. И. Сканави [57], в двухслойном диэлектрике на поверхности раздела слоев по всей толщине его или в тонких приэлектродных слоях происходит медленное накопление зарядов, обуславливающих высоковольтную поляризацию. За счет такого объемного заряда в твердом диэлектрике может получиться аномальное высокое значение диэлектрической проницаемости в области низких частот. Чем чище материал, тем меньше величина высоковольтной поляризации.

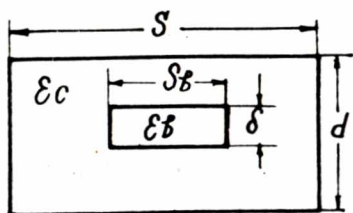


Рис. 1. Схематическое изображение пластины мусковита (площадью S , толщиной d) с включением (площадью $S_{\text{в}}$, толщиной δ).

Основные причины, вызывающие разнообразие в значениях ϵ различных минералов, исследовались А. С. Поваренных [49]. Для ионно-ковалентных минералов ϵ зависит от поляризуемости частиц, которая повышается с увеличением

атомного веса. Степень ковалентности связи, координационное число, количество несвязанных валентных электронов тоже влияют на ϵ , значения которой уменьшаются с увеличением межатомных расстояний.

Зависимость диэлектрической проницаемости мусковита с включениями от диэлектрической проницаемости минералов-включений $\epsilon_{\text{в}}$ может быть рассчитана [33, 51]. Для этого необходимо представить пластинку мусковита с включениями в виде последовательного и параллельного соединения емкостей с различными ϵ (рис. 1). Диэлектрическую проницаемость мусковита с включениями можно получить из формулы

$$C = 0,0884 \left[\frac{\epsilon_{\text{с}}(S - S_{\text{в}})}{d} + \frac{\epsilon_{\text{с}} \epsilon_{\text{в}} S_{\text{в}}}{\epsilon_{\text{в}}(d - \delta) + \epsilon_{\text{с}} \delta} \right] = 0,0884 \frac{\epsilon S}{d}, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость мусковита с включениями;

$\epsilon_{\text{с}}$ — диэлектрическая проницаемость мусковита;

$\epsilon_{\text{в}}$ — » » минерала-включения;

S — рабочая площадь пластины, равная площади обкладок конденсатора, см²;

$S_{\text{в}}$ — площадь включения, см²;

d — толщина пластины мусковита с включением, мкм;

δ — толщина включения, мкм.

После преобразований формула принимает вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \left[1 + \frac{S_B}{S} \left(\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_c \frac{\delta}{d} + \varepsilon_B \left(1 - \frac{\delta}{d} \right)} - 1 \right) \right]. \quad (2)$$

На рис. 2 приведена рассчитанная по этой формуле зависимость ε мусковита с включениями от площади включений с учетом ε_B . Расчеты велись для двух случаев, когда толщина пластинок мусковита составляла 20 (верхний график) и 40 мкм. Толщина включений принята предположительно равной 1 (кривые 1, 3, 5) и 10 мкм (кривые 2, 4, 6). Включения в мусковите сильно различаются по ε , значения ее находятся в пределах от 1 до 81 (табл. 2). Поэтому при построении расчетной зависимости были взяты наиболее характерные для минералов-включений значения ε_B равные 1, 10, 80, что соответствует включениям газа, силикатов и рудных минералов.

При рассмотрении полученной зависимости (рис. 2) можно сказать, что с увеличением площади, занятой включением, ε пластинки будет уменьшаться, когда $\varepsilon_B < \varepsilon_c$, и увеличиваться при $\varepsilon_B > \varepsilon_c$. Изменение ε тем значительнее, чем больше различие в значениях ε_B и ε_c . Кроме того, если толщина включения δ возрастает или увеличивается его площадь, а сама пластинка становится тоньше, то влияние ε_B будет больше.

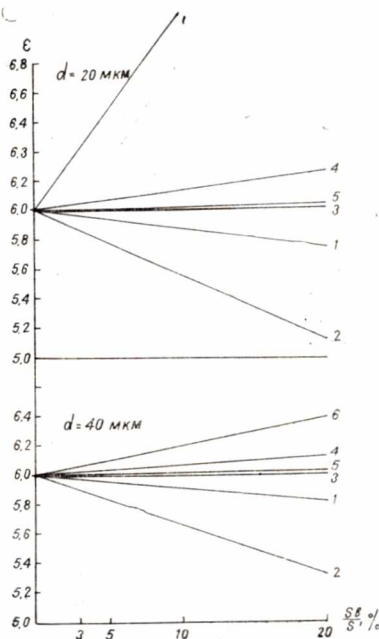


Рис. 2. Расчетная зависимость диэлектрической проницаемости мусковита с включением от площади включения, когда $\varepsilon_B = 1$ (1 и 2), $\varepsilon_B = 10$ (3 и 4) и $\varepsilon_B = 80$ (5 и 6), а толщина — 1 мкм (1, 3, 5) и 10 мкм (2, 4, 6).

Удельное электрическое сопротивление

В диэлектриках в большинстве случаев при нормальных условиях преобладает ионная проводимость. Она может быть осуществлена как за счет собственных ионов, составляющих каркас кристаллической решетки, так и примесных, находящихся в дефектных местах решетки [5]. Собственная электропроводность наиболее заметно проявляется при высокой темпера-

туре, а примесная — при низкой, так как энергия закрепления ионов примеси всегда меньше, чем энергия закрепления основных ионов решетки.

Образец мусковита с включениями нужно рассматривать как неоднородный диэлектрик. При приложении напряжения перпендикулярно слоям слюды (что имеет место в слюдяном конденсаторе) может появиться местное искажение поля [51]. В результате возникает тангенциальная составляющая напряженности E_t , направленная по

плоскостям спайности и вызывающая поэтому заметное увеличение проводимости и диэлектрических потерь. За счет включений электропроводность может изменяться в широких пределах в зависимости от природы включений и их содержания. Включения, как правило, изолированы друг от друга. С увеличением содержания включений уменьшается толщина изолирующих прослоек, возникают электрические контакты между отдельными включениями, и сопротивление падает. Непостоянство в толщине прослойки, изолирующей включение, а также количество контактов и протяженность контактирующих включений обуславливают разброс в значениях сопротивления.

Из приведенной ранее схемы диэлектрика с включением (рис. 1) выведена формула зависимости удельного объемного сопротивления

(рис. 1) выведена формула зависимости удельного объемного сопротивления

$$\rho = \rho_c \left[\frac{1 + \frac{\rho_v - \rho_c}{\rho_c} \cdot \frac{\delta}{d}}{1 + \left(1 - \frac{S_v}{S_c}\right) \left(\frac{\rho_v - \rho_c}{\rho_c}\right) \cdot \frac{\delta}{d}} \right], \quad (3)$$

где ρ_c — удельное объемное сопротивление чистого мусковита, Ом·см;

ρ_v — удельное объемное сопротивление минерала-включения, Ом·см.

Исходя из этой формулы построена графическая зависимость удельного объемного сопротивления пластинки мусковита с включениями от удельного объемного сопротивления, толщины и площади минерала-включения (рис. 3). При $\rho_v > \rho_c$, т. е. в случае газового включения, общее сопротивление пла-

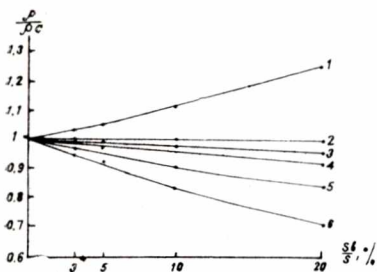


Рис. 3. Расчетная зависимость относительного изменения удельного объемного сопротивления мусковита с включением от площади включения:

- 1 — $\rho_v \gg \rho_c$, $d = 30$ мкм, $\delta = 1$ мкм;
- 2 — $\rho_v \ll \rho_c$, $d = 30$ мкм, $\delta = 1$ мкм;
- 3 — $\rho_v \ll \rho_c$, $d = 20$ мкм, $\delta = 4$ мкм;
- 4 — $\rho_v \ll \rho_c$, $d = 30$ мкм, $\delta = 10$ мкм;
- 5 — $\rho_v \ll \rho_c$, $d = 20$ мкм, $\delta = 10$ мкм;
- 6 — $\rho_v \ll \rho_c$, $d = 30$ мкм, $\delta = 20$ мкм.

стинки мусковита растёт, а при $\rho_v < \rho_c$, как в случае рудных включений, сопротивление пластинки с включениями падает. Увеличение площади низкоомных включений, какими являются сульфиды, магнетиты, гидроокислы железа (табл. 2), приводит к уменьшению сопротивления пластинки, и наоборот, включения, имеющие высокое сопротивление (газы), увеличивают общее сопротивление пластинки. На удельное объемное сопротивление пластинки мусковита с включениями влияет толщина включений. Сопротивление пластинки уменьшается с увеличением толщины низкоомного включения или с уменьшением толщины пластинки. В то же время сопротивление пластинки с включением увеличивается с увеличением толщины высокоомного включения.

Как показано в работе А. С. Семенова [56], «величина удельного сопротивления сравнительно мало зависит от формы включений, пока имеем дело с не очень вытянутыми или не сильно сплюснутыми формами». Однако даже небольшое количество сильносплюснутых проводников (что имеет место в наших пластинках), «может резко уменьшить сопротивление агрегата». В случае проводников более или менее изометрической формы, изолированных друг от друга плохопроводящей средой, «они очень мало влияют на удельное сопротивление агрегата» (стр. 60).

Диэлектрические потери

Диэлектрические потери связаны с переходом части энергии в тепло. Последнее обусловлено проводимостью при постоянном напряжении и медленно устанавливающейся поляризацией при переменном напряжении. Влияние поляризации на $\operatorname{tg} \delta$ зависит от времени установления поляризации и от частоты [7, 11]. В области радиочастот поляризация электронного и ионного смещения происходит за $10^{-14} \div 10^{-15}$ сек. и $10^{-12} \div 10^{-13}$ сек., поэтому эти виды поляризации потерь не вызывают. Релаксационная поляризация устанавливается за время $10^{-5} \div 10^{-7}$ сек. и может быть причиной диэлектрических потерь. При $\omega = 0$ диэлектрическая проницаемость является действительной величиной и имеет наибольшее значение ($\epsilon_0 = \epsilon_{\text{макс.}}$), при $\omega = \infty$ диэлектрическая проницаемость снова становится действительной величиной, но $\epsilon_{\infty} = \epsilon_{\text{мин.}}$

Расчетная зависимость диэлектрических потерь для диэлектрика с включениями, вызванных проводимостью самого диэлектрика, может быть представлена на основании параллельной эквивалентной схемы $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{K \omega \rho \epsilon}$.

Подставляя рассчитанные значения ϵ и ρ из формул (2) и (3), получим зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от объемного удельного сопротивления слюды и минерала-включения, их диэлектрической

проницаемости, содержания включений (по площади) и толщины включения:

$$\operatorname{tg} \delta = \left\{ K \omega \rho_c \varepsilon_c \left[\frac{1 + \frac{\rho_B - \rho_c}{\rho_c} \cdot \frac{\delta}{d}}{1 + \left(1 - \frac{S_B}{S_c}\right) \left(\frac{\rho_B - \rho_c}{\rho_c}\right) \frac{\delta}{d}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{S_B}{S_c} \left(\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_c \frac{\delta}{d} + \varepsilon_B \left(1 - \frac{\delta}{d}\right)} - 1 \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Исходя из этой формулы можно сказать, что $\operatorname{tg} \delta$ в основном зависит от удельного объемного сопротивления минерала-включения.

При $\rho_B \gg \rho_c$, т. е. в случае газовых включений, $\operatorname{tg} \delta$ должен уменьшаться с увеличением содержания включений. Однако при низких напряжениях и низкой частоте газовые включения приводят к росту $\operatorname{tg} \delta$ за счет искажения поля и появления тангенциальной составляющей напряженности. В случае включений силикатных минералов или рудных $\operatorname{tg} \delta$ мусковита почти не изменяется с увеличением содержания этих включений.

Электрическая прочность

Одним из основных свойств, характеризующих качество мусковита, является его стойкость к воздействию напряжения. Исследование закономерностей пробоя диэлектрика, влияние неоднородностей внутреннего и внешнего полей и ряд других вопросов рассматривались В. А. Чуенковым [70], Н. Н. Губкиным [23], А. А. Воробьевым, Г. А. Воробьевым [8, 10], А. А. Воробьевым, Е. К. Завадской [9], П. Бенингом [2], В. Францем [67], Г. И. Сканави [58], М. М. Некрасовым [43] и др. Пробой диэлектрика вызывается электрическими или тепловыми процессами, возникающими в нем с повышением напряженности электрического поля. Пробивное напряжение зависит от толщины и качества диэлектрика, длительности приложенного напряжения, температуры и влажности. Степень неоднородности поля и форма кривой напряжения тоже влияют на величину пробивного напряжения ($U_{пр}$). Электрическая прочность диэлектрика изменяется от максимальных значений в однородном до минимальных — в неоднородном поле. Неоднородность электрического поля зависит от неоднородности внутреннего и внешнего полей. Внутреннее поле определяется однородностью диэлектрика, а внешнее — формой электродов и средой. Неоднородность внутреннего и внешнего полей ухуд-

шает распределение напряжения по толщине и по поверхности пластинки и тем самым снижает $U_{пр}$. Поэтому все характеристики диэлектрика: диэлектрические потери, сопротивление, емкость, электропрочность в той или иной степени связаны с неоднородностью внутреннего и внешнего полей.

Неоднородность внутреннего поля характеризуется слоистостью диэлектрика и его макро- и микроскопической неоднородностью. Мусковит, содержащий включения посторонних минералов, расположенных вдоль плоскости спайности, относится к неоднородным диэлектрикам. В данной работе рассматривается только макро- и микроскопическая неоднородность

Таблица 3

Характеристика среды, в которой проводился пробой

Показатели	Ед. измерения	Среда	
		воздух	парафин
Тангенс угла диэлектр. потерь	—	$10-6 \div 10^{-7}$	$2 \div 7 \cdot 10^{-4}$
Диэлектрическая проницаемость	—	1,0	$1,9 \div 2,2$
Удельное объемное сопротивление	Ом·см	$0,9 \cdot 10^{16} \div 10^{20}$	$10^{15} \div 10^{17}$
Электрическая прочность в однородном поле . .	кв/мм	3,0	$20 \div 30$

диэлектрика, обусловленная включениями. Микроскопические неоднородности, характеризующиеся наличием слабосвязанных релаксирующих ионов, не рассматривались. При однородном поле, т. е. когда отсутствует искажение у краев электродов, $U_{пр}$ линейно зависит от толщины, а $E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}$ соответственно не зависит от толщины диэлектрика. Пробой в этом случае определяет истинную электрическую прочность, свойственную диэлектрику. На эти высокие значения в конденсаторостроении ориентироваться нельзя, так как в условиях эксплуатации поле обычно неоднородно.

В слюдяных конденсаторах рабочей средой являются твердые заливочные массы (церезин, парафин, битум). При их затвердении происходит усадка и возможно наличие воздуха у края обкладок. Поэтому величина напряжения короны для твердой заливки будет иметь те же значения, что при работе конденсатора в воздухе [51]. Диэлектрик в этом случае работает в неоднородном электрическом поле, поэтому испытания мусковита необходимо вести в условиях, близких к рабочим.

Вследствие большой диэлектрической проницаемости слюды по сравнению с воздухом (табл. 2, 3) на краях электродов образуется сгущение электрических силовых линий, т. е. происходит краевой эффект. Чтобы избежать краевых разрядов, пробой при исследовании мусковита с включениями проводился в твердом диэлектрике с $\epsilon \approx 2,0$ (парафин, табл. 3).

Краевой эффект уменьшается, хотя поле остается неоднородным. Пробой плоских образцов мусковита происходит под электродом или по краю его. Характер пробоя электрический, канал в основном круглый.

Диэлектрик с включениями можно представить эквивалентной схемой (рис. 1). Напряжение на включении — U_B , напряжение на диэлектрике — U_C , полное напряжение — $U = U_C + U_B$.

Напряжения распределяются обратно пропорционально емкости при переменном напряжении:

$$\frac{U_C}{U_B} = \frac{C_B}{C_C},$$

тогда согласно рис. 1

$$\frac{U_C}{U_B} = \frac{\epsilon_B(d - \delta)}{\epsilon_C \delta}$$

при условии $S_B = S_C$.

Отсюда

$$U_B = U_C \frac{\epsilon_C}{\epsilon_B} \cdot \frac{\delta}{(d - \delta)}$$

или полное напряжение на образце

$$U = U_C \left[1 + \frac{\epsilon_C}{\epsilon_B} \cdot \frac{\delta}{(d - \delta)} \right],$$

а напряженность образца

$$E = E_C \left[1 + \frac{\delta}{d} \left(\frac{\epsilon_C}{\epsilon_B} - 1 \right) \right],$$

где E_C — напряженность мусковита толщиной $(d - \delta)$, мкм.

При $\epsilon_B \ll \epsilon_C$, отвечающей включению газа, E пластинок с включениями выше, чем E_C чистых пластинок (рис. 4). Когда ϵ_B близка ϵ_C , в случае мусковита с включениями силикатов, напряженность поля изменяется незначительно. В случае рудных включений в мусковите напряженность поля падает, так как $\epsilon_B \gg \epsilon_C$.

Однако, когда пластинка мусковита с включениями находится в электрическом поле, неоднородность поля и слоистость самого диэлектрика сказываются на электрической прочности. Кроме того, имеет место ионизация газа при высоких напряже-

ниях. Поэтому зависимость $E_{пр}$ от диэлектрической проницаемости будет иная. При постоянном токе основное влияние на распределение электрического поля в слоистом диэлектрике оказывают удельные проводимости

$$E_a = E_c \frac{\gamma_c}{\gamma_a} = E_c \frac{\rho_a}{\rho_c},$$

где γ_c, γ_a — удельные проводимости ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$),
 ρ_c, ρ_a — удельные объемные сопротивления слюды и минерала-включения ($\text{Ом} \cdot \text{см}$).

В этом случае зависимость E пластинок с включением от ρ_a включения может быть представлена формулой:

$$E = E_c \left[1 + \frac{\delta}{d} \left(\frac{\rho_a}{\rho_c} - 1 \right) \right].$$

Напряженность на пластинке прямо пропорциональна сопротивлению включения и обратно пропорциональна сопротивлению слюды. При $\rho_a \ll \rho_c$ в случае включений сульфидов, магнетита E поля в пластинке с включениями будет ниже, чем E_c для чистой слюды. При $\rho_a \gg \rho_c$ в случае включений газа E пластинки значительно выше, чем E_c слюды.

Теоретические расчеты зависимости E от ϵ_a и ρ_a представлены на рис. 4. При сравнении функций $E = f(\epsilon_a)$ и $E = f(\rho_a)$ видно, что для одного и того же вида минерального включения E будет носить одинаковый характер. Больше всего на снижение E влияют включения сульфидов и магнетита при максимальной толщине включения.

Чем толще образец мусковита с включением, тем меньше влияние включения на напряженность электрического поля.

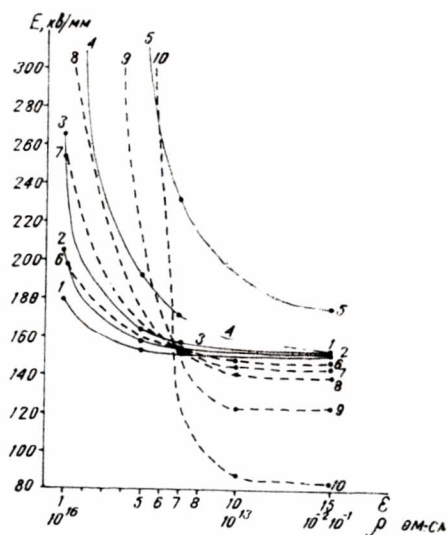


Рис. 4. Расчетная зависимость напряженности электрического поля в мусковите с включениями от диэлектрической проницаемости (1, 2, 3, 4, 5) и удельного объемного сопротивления (6, 7, 8, 9, 10) минерала-включения толщиной $\delta = 1$ мкм (1, 6), 2 мкм (2, 7), 4 мкм (3, 8), 10 мкм (4, 9), 20 мкм (5, 10).

Напряжение поверхностного разряда

Во всех случаях пробоя воздуха на границе с твердым диэлектриком величина пробивного напряжения меньше, чем при отсутствии твердого диэлектрика. П. Бенинг [2] объясняет это тем, что в воздухе содержатся преимущественно отрицательные ионы, которые абсорбируются поверхностью диэлектрика. Поэтому на поверхности твердого тела находится слой отрицательных ионов, а над ним в воздухе — слой положительных ионов. Последние смещаются в электрическом поле вдоль поверхности твердого диэлектрика, оставляя за собой отрицательные ионы как объемный заряд. В этом случае напряженность электрического поля по поверхности диэлектрика распространяется неравномерно. Она повышается вблизи электродов, вследствие чего перекрытие по поверхности твердого диэлектрика происходит при меньшем напряжении, чем в случае отсутствия твердого диэлектрика в промежутке между электродами.

Характеристика диэлектрика по напряжению поверхностного разряда является важным критерием качества конденсаторной слюды и клееной изоляции на основе щипаной слюды [19]. Исследование велось в переменном поле ($f=50$ Гц) по приведенной методике. Определялась зависимость напряжения разряда от расстояния между электродами. Минимальное расстояние между электродами, при котором обеспечивается максимальная чувствительность к включениям в мусковите, 10 мм.

При рассмотрении влияния только основных видов включений на напряжение разряда по поверхности (U_p) приходилось иметь дело с большим разнообразием их распределения в пластинке слюды: внутренние и поверхностные включения, одиночные, в виде цепочек и скоплений, имеющие разную форму и размеры (глава II). Часто встречались сочетания нескольких минеральных включений разной формы, разного распределения в пластинке и размера. Поэтому при рассмотрении вопроса о влиянии рудных и нерудных включений, а также формы включения и размеров использовали принцип моделирования. Рудные включения, имеющие небольшое сопротивление и являющиеся проводниками, были имитированы свинцово-оловянной фольгой с сопротивлением не более 25 мкОм·см, а нерудные — биотитом с сопротивлением близким мусковиту.

Исследовались зависимости напряжения поверхностного разряда мусковита от вида, размера, распределения, глубины залегания включений (или толщины перекрывающего слоя мусковита). Как показано на рис. 5, 6 низкоомные «включения» фольги оказывают большое влияние на U_p мусковита по сравнению с включениями биотита. Исследованием влияния расположения включений относительно направления электрического поля установлено, что U_p снижается в 2,8 быстрее при

увеличении размера включения вдоль поля, чем поперек. Напряжение поверхностного разряда не зависит от толщины проводящего «включения», а зависит от площади (рис. 5), уменьшаясь с ростом последней. Особенно это относится к линейным «включениям», расположенным вдоль поля. Напряжение разряда по поверхности зависит от степени концентрации включений: так, при равномерном распределении (сыпь) «включений» биотита в межэлектродном промежутке мусковит имеет высокие значения U_p по сравнению с расположением «включений» в виде скопления. С увеличением плотности скопления U_p понижается.

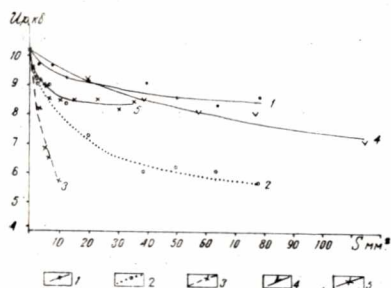


Рис. 5. Зависимость напряжения поверхностного разряда от площади имитированных изометричных «включений» биотита (1) и фольги (2), а также линейных «включений» (3, 4, 5) размерами (мм²) поперек и вдоль поля: 1× (от 0,5 до 10); 35× (от 0,5 до 10); (от 1 до 30)×1.

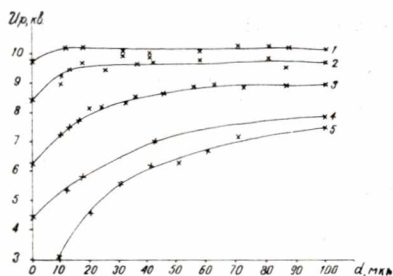


Рис. 6. Зависимость напряжения поверхностного разряда от толщины мусковита, перекрывающего имитированные включения биотита размером Ø 4 мм (1), фольги — Ø 2, 4, 7 мм (2, 3, 4) и 3,5×5,5 мм² (5).

Рассмотренные включения в мусковите сильно уплощены, толщина их менее 4 мкм. При толщине слюдяных изделий 20—65 мкм эти включения находятся между слоями слюды вдоль плоскости совершенной спайности, т. е. перекрыты чистым мусковитом от действия приложенного напряжения вдоль поверхностного слоя. В связи с этим был рассмотрен вопрос о влиянии толщины перекрывающего слоя чистого мусковита на напряжение поверхностного разряда.

Напряжение поверхностного разряда при расположении «включения» на поверхности слюды самое низкое. С увеличением толщины перекрывающего слоя слюды U_p растет до определенного значения (рис. 6) и при дальнейшем увеличении становится постоянным.

Глава II

ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ-ВКЛЮЧЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕНИЕ В МУСКОВИТЕ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Задача заключалась в том, чтобы исследовать различные физические свойства мусковита с включениями на одной пластинке.

Это условие было выполнено при измерении тангенса угла диэлектрических потерь на частотах 1 кГц, 1 МГц, емкости, температурного коэффициента емкости и испытания напряжением. Остальные измерения физических характеристик мусковита с включениями проводились на разных образцах, так как подготовка пластинки перед измерением или изменения в ней, связанные с одними испытаниями, не позволяли использовать те же пластинки при других испытаниях. Это имело место при измерении удельного объемного сопротивления и напряжения поверхностного искрения.

Для испытаний подбирались пластинки преимущественно с одним видом включений. Подсчет площади, занятой включениями, проводился с помощью лупы с 6х увеличением по методике ГОСТа 10918-64 [17].

Испытывались на $U_{исп}$, $E_{пр}$, $tg \delta$, ϵ пластинки слюды конденсаторного типа размером 14×14 мм, на ρ — размером 30×30 мм; толщина составляла от 20 до 40 мкм. Напряжению поверхностного разряда подвергались образцы размером 40×60 мм [17, 20]. Толщина этих пластинок определялась как средняя из трех измерений на одной пластинке. Разность толщины не превышала 0,005 мм. Измерение толщины проводилось с помощью микроиндикатора с пределом измерения 0—1 мм, имеющего погрешность 0,0005 мм и оптиметра ИКВ, с погрешностью 0,0002 мм.

Пластинки слюды из каждой пробы, подготовленные по размерам, толщине, с описанием вида и характера включений готовились для физических исследований по методике ГОСТа [17]. При измерениях тангенса угла диэлектрических потерь и удельных сопротивлений для обеспечения лучшего контакта применялись электроды из серебра марки Ср 999,9, нанесенные

на образец распылением в вакууме при остаточном давлении не более 10^{-3} мм рт. ст. Такие электроды позволяют заменить собой обкладки конденсатора на более плотные, без зазоров между электродом и фольгой. Это вызывает уменьшение потерь энергии, повышает эффективность диэлектрической проницаемости.

Мусковит с включениями исследовался в направлении, перпендикулярном плоскости совершенной спайности. В этом случае обеспечивается оптимальное использование диэлектрика в наивыгоднейшем направлении [73].

Все исследования физических свойств, кроме измерения температурного коэффициента емкости, проведены при комнатной температуре.

Удельное объемное сопротивление определялось с помощью тераомметра Ф-507 с непосредственным отсчетом величины измеряемого сопротивления. Измерения производились при напряжении постоянного тока 100 В. Удельное объемное сопротивление рассчитывалось по формуле:

$$\rho = R \frac{\pi(D_0 + D_{из})^2}{16d} = 1,13 \frac{R}{d} \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

где R — объемное сопротивление, Ом;

$D_0 = 1,4$ см — внутренний диаметр охранного кольца;

$D_{из} = 1,0$ см — диаметр измерительного электрода;

d — толщина пластинки, см.

Таблица 4

Погрешность измерения ρ чистых пластинок

d , мкм	$\frac{\Delta d}{d}$, %	$\frac{\Delta D}{D}$, %	$\frac{\Delta R}{R}$, %	Полная погрешность, %	Разброс экспериментальных значений
					$\frac{\Delta \rho}{\rho_{ср}}$, %
32	6,25	1,2	15	22,5	52
33	6,06	1,2	15	23,3	89

Отсчет производился через 1 мин. после включения напряжения. Измерение ρ велось с помощью 3-электродной системы латунных электродов. Установка электродов, их размеры, схема включения образцов с электродами выполнены в соответствии с методикой, изложенной Д. М. Казарновским, Б. М. Тареевым [27] и ГОСТом [15]. Контакт с образцом обеспечивался давлением около 100 г/см^2 .

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) при частотах 1 МГц определялся с помощью моста ИПП-6. Погрешность измерения составляла $\pm (0,05 \operatorname{tg} \delta + 1 \cdot 10^{-4})$. Пределы измерения моста от 0 до $200 \cdot 10^{-4}$. Отсчет велся по шкале от 0 до $30 \cdot 10^{-4}$ с первой отсчетной точкой $0,5 \cdot 10^{-4}$. Измерение проводилось

Таблица 5

Погрешность при определении ε чистых пластинок

d , мкм	$\frac{\Delta d}{d}$, %	$\frac{\Delta S}{S}$, %	$\frac{\Delta C}{C}$, %	Полная погрешность, %	Разброс экспериментальных значений	
					$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon \text{ ср}}$, %	$\frac{\Delta \varepsilon_{\text{кв}}}{\varepsilon \text{ ср}}$, %
20	10	1,6	0,2	11,8	3,5	4,3
30	6,7	1,6	0,2	8,5	2,6	4,0
40	5,0	1,6	0,2	6,8	0,8	1,0
55	3,6	1,6	0,2	5,4	7,9	1 1

с помощью двух латунных электродов размером 12×12 мм при давлении на образец около 100 г/см^2 .

Диэлектрические потери и емкость при частоте 1 кГц измерялись на мосте МЛЕ-1 прямым методом [29]. Погрешность

Таблица 6

Погрешность при определении электрической прочности $E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}$

d , мкм	$\frac{\Delta d}{d}$, %	$\frac{\Delta U}{U}$, %	Полная погрешность, %	Разброс экспериментальных значений, %
20	10	2,0	12,0	4,1
30	6,7	2,7	9,4	14,0
40	5,0	2,1	7,1	7,2

при измерении $\operatorname{tg} \delta$ составляла $\pm (0,02 \operatorname{tg} \delta + 5 \cdot 10^{-4})$ и при измерении емкости ± 2 пф. Измерения велись на образцах, собранных в секции, по схеме, приведенной в ГОСТе 10918-64.

Диэлектрическая проницаемость находилась из формулы емкости:

$$\varepsilon = \frac{Cd}{0,0884S},$$

где C — емкость слюдяного конденсатора, пф,
 d — толщина диэлектрика, см,
 S — площадь электродов, см^2 .

Испытание переменным напряжением при частоте 50 Гц ($U_{\text{исп}}$), выдержка до 10 сек., измерение электрической прочности ($E_{\text{пр}}$) и напряжения разряда по поверхности (U_p) проводились с помощью установки АИИ-70 и УПУ-1М с непосредственным отсчетом напряжения по киловольтметру С-96.

$U_{\text{исп}}$ и $E_{\text{пр}}$ измеряли на тех же образцах слюды, собранных в секции, на которых измерялись $\text{tg } \delta$ при 1 МГц, 1 кГц и ϵ . Сначала образец выдерживался при напряжении, соответствующем требованию ГОСТа 7134-64 на конденсаторную слюду в зависимости от его толщины, а затем напряжение плавно подавалось до пробоя со скоростью 1 кВ/сек. Средой в данном случае являлся парафин с $\epsilon=2$, чтобы исключить ионизацию у края образца (ГОСТ 6433-65).

Исследование напряжения разряда по поверхности проводилось на электродах, соответствующих ГОСТу 10917-64 [20]. Electroды выполнялись из латуни в виде четырехгранной усеченной пирамиды с прямоугольным основанием. Расстояние между электродами выбрано минимальное, которое обеспечивает максимальную чувствительность U_p к наличию включений в образце.

Температурный коэффициент емкости при частоте 1,6 МГц определялся с помощью прибора ТКЕ-2М [72]. Приращение емкости и емкость испытуемых конденсаторных блоков измерялись методом замещения емкостью соответствующих градуированных конденсаторов. Температура в камере нагрева устанавливалась автоматически. Испытуемый блок выдерживался при данной температуре ($t_1=30$ и $t_2=70^\circ\text{C}$) в течение 2 мин. Температурный коэффициент емкости определялся по формуле:

$$\text{ТКЕ} = \frac{(C_2 - C_1)A}{C_1},$$

где C_1 — емкость испытуемого конденсатора при температуре t_1 ,
 C_2 — емкость испытуемого конденсатора при температуре t_2 ,

$$A = \frac{K}{t_2 - t_1}, \quad \text{при } K = 1,37.$$

Погрешность измерения емкости составляла $\pm 0,01$ Спф. Погрешность измерения $\Delta \text{ТКЕ} = \pm (0,05 \text{ТКЕ} + 5 \cdot 10^{-6})$.

СУЛЬФИДЫ И ПЕРСУЛЬФИДЫ ЖЕЛЕЗА

Пирротин

Точная диагностика и описание включений пирротина были проведены Г. П. Сафроновой и Р. П. Эйгирд [55]. Параллельно, по рекомендации Г. П. Сафроновой, авторы повторили рентгеновский анализ включений пирротина (в лаборатории Института геологии). Рентгенограммы снимались на Fe от-

Значения межплоскостных расстояний для включений пирротина и пирита

Пирротин, обр. 1			Пирротин, обр. 2			Пирит, обр. 4		
d_{α}, k_x	d_{β}	I	d_{α}, k_x	d_{β}	I	d_{α}, k_x	d_{β}	I
						3,126	2,834	2
2,970	2,692	4	2,965	2,688	4	2,980	2,701	2
2,911	2,639	1	2,914	2,641	1			
						2,700	2,448	10
						2,670	2,420	1
2,637	2,390	5	2,640	2,393	5			
						2,417	2,191	9
2,273	2,060	2	2,272	2,060	3			
						2,206	1,999	9
2,055	1,863	10	2,059	1,866	10			
						2,107	1,910	1
			2,042	1,851	1	2,065	1,872	1
						1,910	1,731	9
1,890	1,713	2	1,890	1,713	1			
						1,800	1,631	5
1,766	1,601	1						
1,716	1,555	9	1,716	1,555	10			
						1,654	1,500	1
						1,634	1,481	10
1,602	1,452	3	1,602	1,452	1			

						1,596	1,450	1
						1,564	1,418	2
1,486	1,347	1				1,504	1,363	5
1,453	1,317	1	1,440	1,304	1	1,446	1,311	7
1,438	1,303	2						
1,428	1,294	2	1,420	1,287	1			
1,319	1,195	7	1,321	1,200	7			
1,290	1,169	2						
						1,240	1,124	3
1,213	1,099	1	1,206	1,093	1	1,209	1,096	4
1,172	1,062	2	1,168	1,058	2	1,179	1,069	5
1,154	1,046	1	1,149	1,042	1	1,153	1,045	2
						1,147	1,039	2
1,103		2				1,104	1,000	6
1,100		6	1,100	0,9974	2			
			1,097		4	1,089		1
1,068		1				1,053		1
1,048		4						
1,046		2	1,045		7	1,041		10
						1,039		3
						1,005		8
						1,003		3
0,9934		2	0,9920		2			
0,9910		1						
			0,9893		2			
						0,9872		6
						0,9860		2

фильтрованном излучении в камере Р_кД с $D=57,3$ мм, $d_{обр.}^{\wedge}=0,5$ мм на приборе УРС-70 в режиме: $U=35$ кВ, $I=14$ мА. Значения межплоскостных расстояний показаны в табл. 7.



Рис. 7. Включения пирротина (Py) и сростки пирротина с пиритом (Py₂) изометричного и удлиненного облика. Увел. 30.



Рис. 8. Ихтиоглиптовидные включения пирротина. Увел. 40.

Окраска. Одним из основных диагностических признаков, позволяющих отличать рудные включения друг от друга и от анизотропных — биотита и хлорита, является их окраска. Пирротин, наблюдаемый в мусковите в виде пластинчатых включений, выглядит непрозрачным, т. е. черным, и лишь тончайшие пленки просвечивают серым цветом (рис. 7, 8). В отраженном свете при визуальном и микроскопическом наблюдении пленочные и пластинчатые включения пирротина характеризуются кремовой окраской, которая в зависимости от толщины листочков мусковита, покрывающих включение, сравнительно чистая (яркая) или с серым оттенком. При толщине листочков мусковита более 0,4—0,5 мм диагностика пирротина и других рудных включений по цвету затрудняется или невоз-

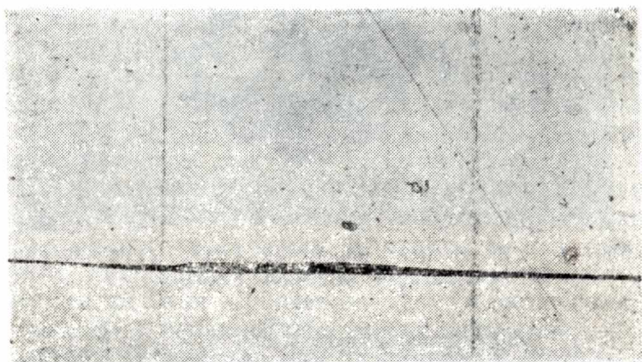


Рис. 9. Линейное включение пирротина. Увел. 4.

можно. В мусковите нередко наблюдаются оптические эффекты, проявляющиеся в ярких розовых, оранжевых, голубых и зеленых цветах, обусловленные воздушными расслоениями. Если указанные расслоения находятся над включением и мешают установить его цвет, рекомендуется поднять листочки мусковита и вскрыть «естественную» окраску пирротина или диагностировать включение с противоположной стороны пластинки слюды.

Форма включений пирротина исключительно разнообразна. Преимущественное развитие имеют симметричные и неправильные шестиугольники, трапеции, лейсты, ихтиоглипты, разной конфигурации сростки и пятнообразные включения неопределенных очертаний (рис. 7, 8, 9). Некоторые из перечисленных форм (особенно шестиугольники, лейсты, ихтиоглипты) имеют и такие минеральные включения в мусковите, как пирит, магнетит в качестве псевдоморфоз по пирротину и биотит. Во избежание ошибок для диагностики необходимо устано-

вить окраску включений в отраженном и проходящем свете и магнитные свойства, характерные для магнетита и пирротина. В некоторых включениях пирротина в проходящем свете на-

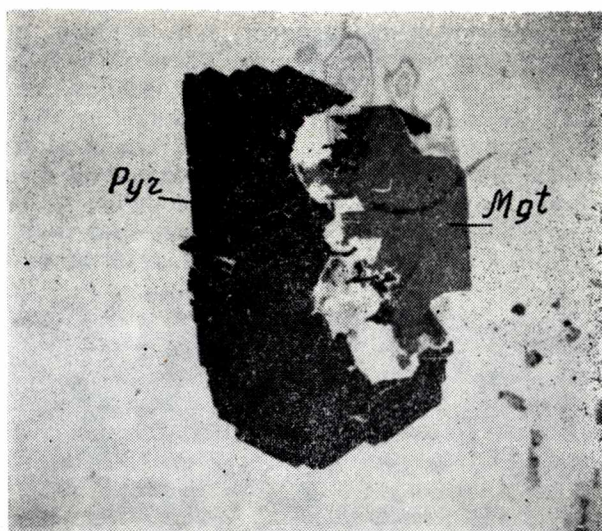


Рис. 10. Включение пирротина (Pyz) в ассоциации с магнетитом (Mgt). Увел. 75.

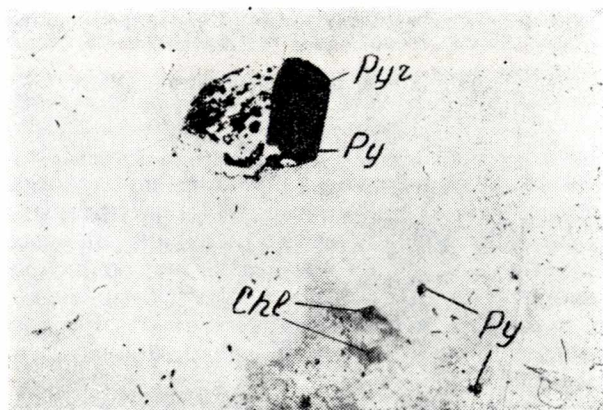


Рис. 11. Включения пирротина (Pyz) с пиритом (Py), пирита в хлорите (Chl) и хлорита. Увел. 4.

блюдаются беспорядочно располагающиеся трещины и трещины отдельности, ориентированные относительно друг друга под углами 60 или 120°. Последние нередко вырисовывают контуры шестиугольников, стороны которых соответственно парал-

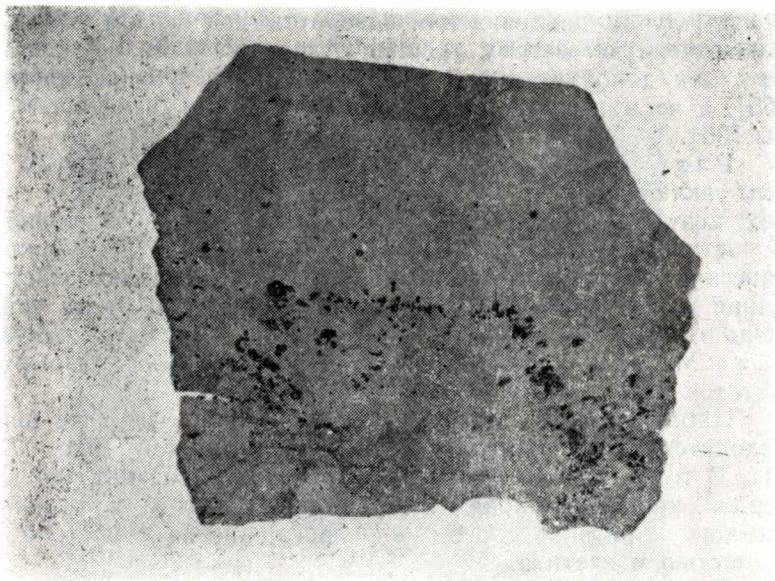
лельны лучам давления или повернуты под углом 30° к ним. Закономерную систему трещин отдельности можно использовать как дополнительный диагностический признак пирротина [55], а не магнетита, как ранее утверждали некоторые авторы [30].

Размеры включений пирротина, подобно другим рудным включениям в мусковите, изменяются в широких пределах, поэтому не служат для него отличительной особенностью. В частности, наблюдались кристаллики пирротина микроскопические, точечные и до $0,5\text{—}1,0\text{ см}^2$ по площади, лейсты по длине до 2,0 см. Более крупные включения пирротина установлены в мусковите пегматитовых жил III и IV типов месторождения Малиновая Варакка и в мусковите плагиоклазовых пегматитов жил III типа месторождения Тэдино.

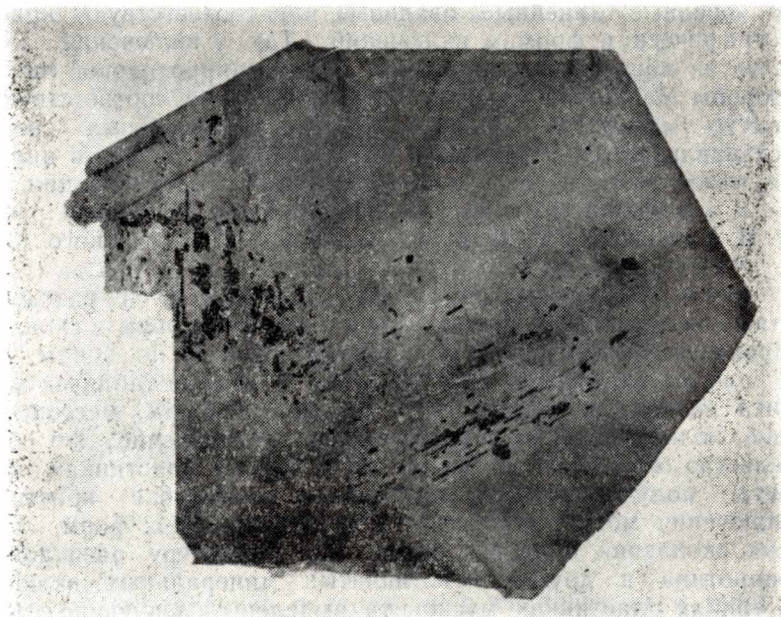
Наблюдения показали, что пирротин в мусковите нередко находится в сростании с пиритом и магнетитом (рис. 7, 10, 11). В том и другом случае его нетрудно распознать по характерной кремовой окраске в отраженном свете в отличие от желтого пирита и серого, сине-серого, иногда с пестрой побелостью магнетита.

Пирит и магнетит обычно окаймляют кристаллики пирротина, а иногда магнетит составляет значительную долю единого по форме рудного включения. Контакты между ними взаимно неровные, линейные, овальные или соответствуют кристаллографическим формам включений. Так, у включения состоящего из магнетита и пирротина, контур пирротиновой части со стороны магнетита нередко шестигранный, а соответствующий контур магнетита — дендритовидный. В отдельных сростках устанавливаются игловидные микроапофизы пирита в пирротине, позволяющие судить о более поздней кристаллизации пирита и замещении им пирротина. Этот факт отмечен в работах Э. Я. Гурьевой [24], Б. Е. Карского и Г. П. Луговского [30].

Расположение пирротина в кристаллах мусковита. Включения пирротина наблюдаются в разных частях кристаллов мусковита в виде одиночных форм и скоплений. Преимущественно [1] они концентрируются по зонам роста и полосам ельчатости (рис. 12 а, б). В объеме табличек мусковита включения меняются по форме, размерам, местоположению, колеблется и их количественное соотношение. Это обстоятельство объясняет тот факт, что в тонких пластинках мусковита, получаемых при подколке и калибровке кристаллов, включения могут находиться в виде одиночных форм, отдельных скоплений и других видах. По характеру расположения пирротина и других пластинчатых минеральных включений в тонких пластинках мусковита выделены следующие группы: одиночные или спорадические (рис. 9, 10, 13 б, 29 в, 30 в), цепочки (рис. 22), линейные (рис. 9), скопления (рис. 7, 8 32 а, б), сыпь (рис. 20).



a



б

Рис. 12. Расположение пирротина в кристалле мусковита:
a — по зонам роста, *б* — по полосам ельчатости. Увел. 1.5.

Пирит

Окраска. Пирит, как пирротин, минерал непрозрачный. В проходящем свете его пластинчатые включения характеризуются черным цветом, а в тонких пленках — просвечивают синим. В отраженном свете пирит, в отличие от пирротина, характеризуется желтой окраской, различимой визуально и более четко при микроскопическом наблюдении; включения, окисленные с поверхности, обычно отсвечивают пестрыми цветами побежалости. Как диагностический признак Б. Е. Карский и Г. П. Луговской [30] рекомендуют использовать структурную поверхность, весьма характерную для граней куба данного минерала. Это своеобразный узор, составленный микроуглублениями разной формы, параллельно или диагонально ориентированными относительно ребер квадратных граней пирита. Точная диагностика включений пирита получена рентгеновским методом Дебая (табл. 7).

Важное свойство, которое отличает пирит от пирротина, — это отсутствие магнитных свойств у пирита и его исключительная стойкость по отношению к соляной кислоте. Пирротин разлагается в соляной кислоте и в момент начальной стадии разложения, при значительных размерах включения, иногда улавливается запах сероводорода.

Форма включений пирита в мусковите разнообразна: под микроскопом различаются квадраты, прямоугольники, их сростки, иглы, дендриты, овальные и неправильные пластинки (рис. 13 а, б). Реже включения пирита наблюдаются в виде пятен по краю кристаллов мусковита. В отличие от пирротина в пирите наблюдаются одиночные неровные трещинки, беспорядочно секущие включения.

Размеры включений пирита меняются от микроскопических до 0,3—0,5 см, реже 2—3 см по удлинению кристаллика. В табличках мусковита только размером 100 см² и более встречались пластинчатые включения пирита до 5 см в поперечнике.

Расположение пирита в кристаллах мусковита спорадическое или в виде небольших скоплений по зонам роста и полосам ельчатости. Как уже отмечалось, пирит находится преимущественно в ассоциации с пирротином (рис. 7, 11). Повышенная концентрация пирита, в отличие от пирротина, устанавливается в периферической зоне кристаллов мусковита, которая иногда деформирована, т. е. рассечена тонкой трещиноватостью, помята и расслоена вдоль спайности. Эти включения пирита обычно более крупные по сравнению с теми, которые располагаются во внутренней зоне кристаллов слюды. Но в яркоокрашенной кайме ровных однороднозональных табличек мусковита включения пирита практически отсутствуют. Мелкий, до микроскопических включений, пирит наиболее ча-

a



б

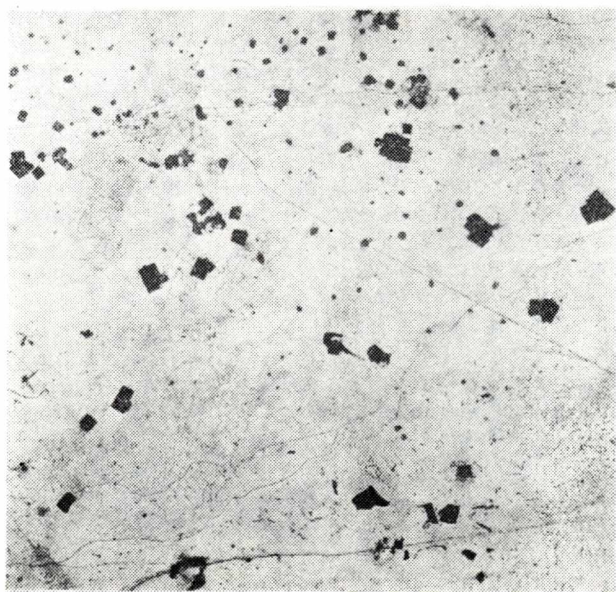


Рис. 13. Включения пирита:
a — дендритовидные, увел. 18; *б* — изометрических очертаний, увел. 16.

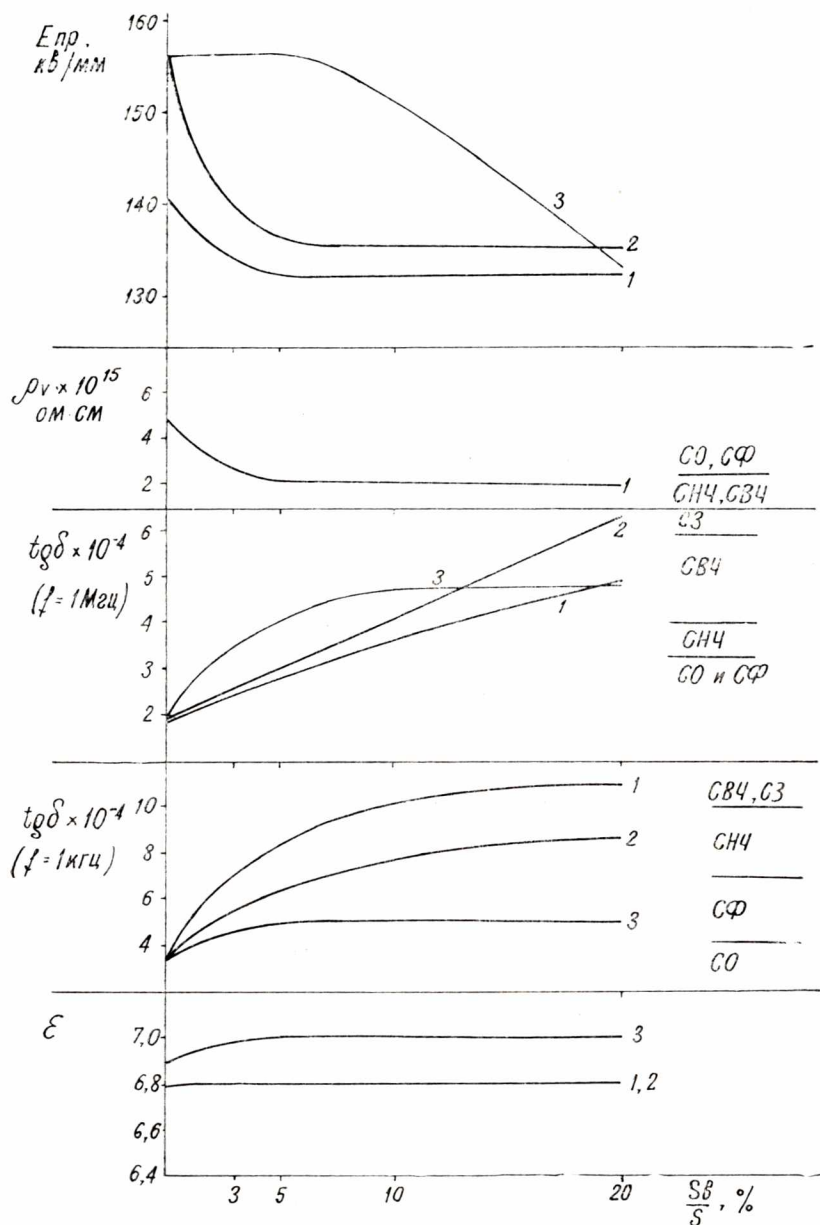


Рис. 14. Зависимость электрических свойств мусковита от площади включений сульфидов:

1 — внутри пластинки, $d=20-40$ мкм; 2 — $d=20-30$ мкм; 3 — на поверхности пластинки, $d=20-30$ мкм.

сто устанавливается в ровных и плотных внутренних участках кристаллов слюды, преимущественно небольших размеров (до 25 см²). Их число при визуальном наблюдении не превышает 2—5 шт./см² площади пластинки; при микроскопическом осмотре той же площади количество включений насчитывается до 15—30 шт. Нередко пирит ассоциирует с хлоритом (рис. 11).

Исследования электрических свойств мусковита без видимых включений и с включениями проводились на выколотых из кристаллов тонких пластинках (подборах), отвечающих требованиям технических условий на конденсаторную слюду (кроме пунктов, относящихся к включениям). Так как кристаллы

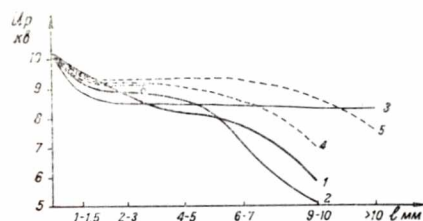


Рис. 15. Зависимость напряжения поверхностного искрения мусковита от величины изометричных включений вдоль электрического поля:

1 — сульфиды железа, 2 — магнетит, 3 — гидрокислы железа, 4 — биотит, 5 — хлорит, 6 — газ.

мусковита имеют большое количество природных дефектов (чешуйчатость, зажимистость, ельчатость, трещиноватость, волнистость, складчатость), то выход из них подборов колотых или конденсаторных, содержащих участки, не затронутые этими нарушениями (полезная площадь), невелик. Включения сульфидов, концентрирующиеся по зонам роста, полосами ельчатости (рис. 12 а, б) и по самому краю кристалла, не влияют на электрические свойства и удаляются при технологиче-

ской обработке. Исследовались пластинки мусковита с включениями только на бездефектной площади подборов.

Содержание колотых подборов ($d=100-300$ мкм) с включениями сульфидов на полезной площади в рассматриваемых пробах мусковита составляет от 1,2 до 17% (от промышленного сырца) при выходе подборов без каких-либо видимых включений от 11,8 до 57,0%. Выход калиброванных подборов ($d=20-40$ мкм) с включениями сульфидов из промышленного сырца составляет около 1%, при выходе калиброванных подборов без включений от 4,0 до 22,6% или до 5% от общего извлечения чистых калиброванных подборов.

Влияние включений сульфидов* на электрические свойства мусковита. Поскольку включения пирротина и пирита в мусковите часто ассоциируют генетически или пространственно (рис. 7, 11), трудно подобрать достаточное количество образцов только с одним минералом-включением. Они рассматривались вместе.

Из рудных минералов-включений пирротин обладает наи-

* В тексте сульфидами именуются сростания пирротина и пирита.

большим значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon_B > 81$) и наиболее низким значением удельного объемного сопротивления ($\rho_B < 10^{-1}$ Ом·см). Пирит имеет несколько меньшее значение ϵ_B ($31 < \epsilon_B < 81$) и близкое к пирротину значение ρ_B (табл. 2). Согласно рассчитанным зависимостям электрических характеристик (рис. 2, 3, 4) включения сульфидов увеличивают ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ мусковита и понижают ρ , $E_{\text{пр}}$ и U_p (рис. 14, 15). Причем с ростом содержания включений в мусковите (по занимаемой площади) эти характеристики будут соответственно изменяться: растет ϵ и $\operatorname{tg} \delta$, падает ρ и $E_{\text{пр}}$.

Предельные значения допускаемых физических характеристик слюды по ГОСТу 7134-64 для конденсаторной слюды марки СО, СФ, СНЧ, СВЧ, СЗ показаны на рис. 14, 16, 23 и др. Марка СО — образцовая, используется в контурах особо точной настройки в качестве эталона емкости и должна обладать высокой стабильностью емкости и малыми значениями $\operatorname{tg} \delta$ как при высоких, так и при низких частотах. Марка СФ — фильтровая, применяется для аппаратуры многократной проводной связи, по своему качеству приближается к образцовой слюде. Марка СНЧ — слюда низкочастотная, применяется для радиоконденсаторов низкой частоты, которые должны иметь малое значение $\operatorname{tg} \delta$ на этой частоте. Марка СВЧ — слюда высокочастотная, применяется для радиоконденсаторов высокой частоты, которые должны иметь небольшой $\operatorname{tg} \delta$. Марка СЗ — защитная, используется в качестве изоляции от контура и для изоляции между секциями. Значение $\operatorname{tg} \delta$ определяется по соглашению сторон.

По величине ϵ мусковит с включениями сульфидов соответствует ГОСТу на конденсаторную слюду. Анализ измерений ϵ показал, что отдельные пластинки мусковита как чистые, так и с включениями имеют пониженное против ГОСТа значение ϵ . В пластинках без включений $\epsilon < 6$ у 1,76% всех испытанных образцов; в пластинках с сульфидами до 5,10 и 20% занимаемой площади $\epsilon < 6$ соответственно у 3,1; 5,0 и 8,1% образцов.

Диэлектрическая проницаемость мусковита с включениями сульфидов монотонно возрастает при увеличении температуры до 30 и 70°C. Соответственно растет емкость пластинок с содержанием включений до 10% и более. ТКЕ таких образцов принимает значения от 45 до $86 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Это наибольшие значения ТКЕ для мусковита с различными включениями, рассматриваемыми в работе. Мусковит с включениями сульфидов по изменению емкости от температуры соответствует требованиям, предъявляемым к конденсаторам группы В и Г [14].

Низкоомные включения сульфидов, расположенные, как правило, в небольшом количестве слоев мусковита, снижают сопротивление незначительно по сравнению с образцами без включений. Пластины с включениями сульфидов до 5% мо-

гут быть отнесены к маркам СО и СФ; при $S_v > 5\%$ — к маркам СНЧ и СВЧ.

Включения сульфидов увеличивают в мусковите диэлектрические потери наиболее сильно при $f=1$ кГц и содержании этих включений до 10%. Среднее значение измерений $\operatorname{tg} \delta$ показывает, что в мусковите марки СО практически не допускаются включения сульфидов. Они могут быть в мусковите марки СФ при содержании до 3% и в марке СНЧ до 10%. Анализ всех измерений $\operatorname{tg} \delta$ на этой частоте показывает, что до 45,3% пластинок с включениями сульфидов до 3% на рабочей площади могут быть отнесены к марке СО. А при содержании до 10% сульфидов на полезной площади 34,5% пластинок мусковита могут быть отнесены к марке СО.

При $f=1$ МГц влияние включений сульфидов на диэлектрические потери значительно меньше. По средним данным $\operatorname{tg} \delta$ марке СО и СФ соответствуют пластинки с включениями сульфидов до 5%, марке СНЧ — до 12% на рабочей площади. Анализ всех измерений показывает, что до 84,1% пластинок с включениями сульфидов до 3% соответствуют СО; а 52,8% пластинок соответствуют СО при содержании до 10% сульфидов.

Пластинки мусковита с сульфидами, прошедшие испытание на ϵ и $\operatorname{tg} \delta$, подвергались воздействию переменного напряжения ($f=50$ Гц) в течение 10 сек. В основном все пластинки выдержали $U_{\text{исп}}$ независимо от содержания включений. Наибольшее влияние на $U_{\text{исп}}$ мусковита оказывают поверхностные и межслоевые включения линейной ($l=8-10$ мм) и изометричной формы в виде скоплений на краях пластинки, даже если содержание не превышает 3—5%. Пробивались при испытаниях пластинки с включениями на краевых участках. В данном случае имело место перекрытие диэлектрика по поверхности, так как удельное поверхностное сопротивление ниже внутреннего и объемного на 1—2 порядка.

Исследование мусковита с сульфидами на пробой, проведенное в парафине для исключения краевых утечек, выявило, что они снижают $E_{\text{пр}}$ по сравнению с чистыми пластинками. В данном случае неоднородность электрического поля, создаваемая включением, приводит к пробое диэлектрика, чаще всего на границе с проводящим электрический ток сульфидом. С увеличением площади, занимаемой включением, $E_{\text{пр}}$ падает, так как значение ϵ для мусковита с включениями возрастает.

Кроме влияния общего содержания включений, определяемого занимаемой площадью, на электрические характеристики слюды существенно сказываются форма, величина и распределение включений (рис. 16). Ихтиоглиптовидные включения сульфидов в основном микроскопических размеров и наиболее тонкие, по сравнению с изометричными включениями (рис. 7, 8), оказывают наименьшее влияние на электрические

свойства мусковита. По мере увеличения крупности (рис. 15) и толщины (переход от серых к черным включениям сульфидов, рис. 16) при одинаковом содержании включений потери увеличиваются, а напряжение поверхностного разряда (U_p) падает. Наибольшие потери создают одиночные включения сульфидов лейстовидной (при $f=1$ МГц) или изометричной формы (при $f=1$ кГц; рис. 7, 9, 16). Так, увеличение длины

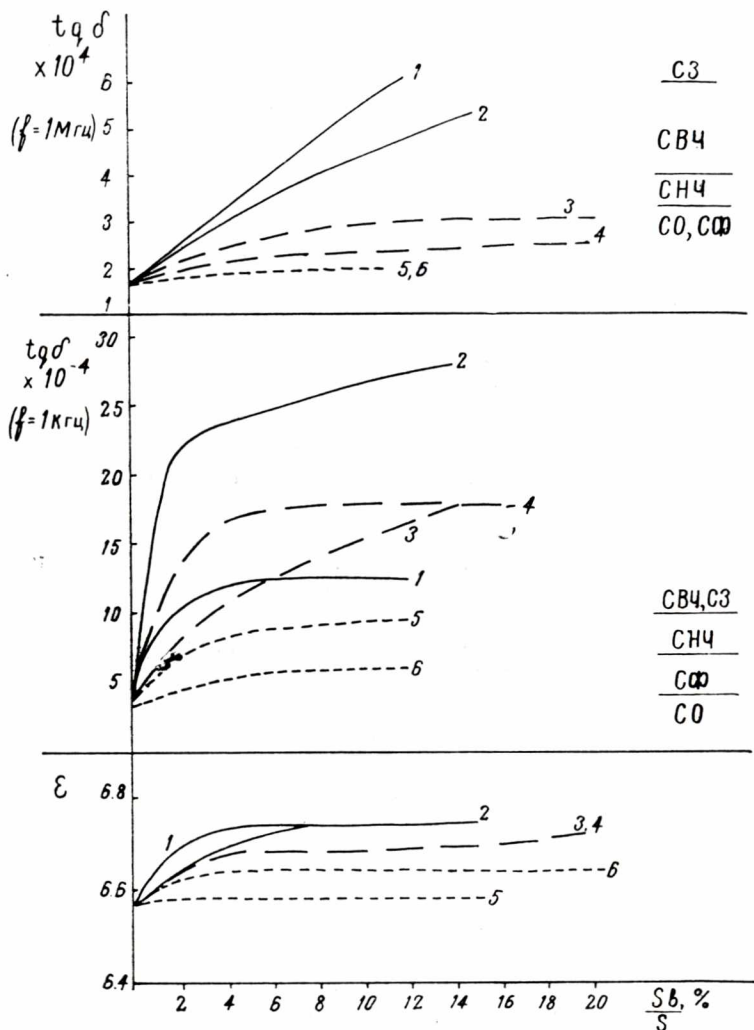


Рис. 16. Влияние распределения и формы включений сульфидов на электрические свойства мусковита:

Линейные: 1 — одиночные; изометричные: 2 — одиночные, 3 — скопления, 4 — спорадические; иктиоглиптовидные: 5 — скопления, 6 — пыль.

включения от 5 до 15 мм при одинаковой площади приводит к росту $\operatorname{tg} \delta$ от 2,3 до $5,2 \cdot 10^{-4}$ при $f=1$ МГц и с 4,5 до $9,5 \cdot 10^{-4}$ при $f=1$ кГц. Это связано с возрастанием неоднородности внутреннего электрического поля и снижением сопротивления вдоль плоскости совершенной спайности.

Значения U_p зависят от глубины залегания включений в пластинке мусковита. В случае поверхностного расположения включений — они минимальные. Потери при низких значениях частоты тока для пластинок с поверхностными включениями возрастают с ростом S_v , но меньше, чем для пластинок с внутренними включениями (рис. 14). По мере роста частоты $\operatorname{tg} \delta$ для пластинок с поверхностными и внутренними включениями становится близким. Поверхностные включения сульфидов при малых содержаниях (до 5%) почти не влияют на $E_{пр}$. При $S_v > 5\%$ резко падает $E_{пр}$ у образцов с поверхностными включениями и при $S_v = 20\%$ $E_{пр}$ близки для пластинок с поверхностными и внутренними изолированными включениями сульфидов.

Плотность распределения включений также влияет на электрические показатели (рис. 16). Пластинки мусковита с иктиоглиптовидными включениями сульфидов, равномерно распределенными в виде сыпи, могут быть отнесены только к марке СФ. Подобные включения сульфидов, образующие скопления, увеличивают потери в диэлектрике. Такие пластинки с сульфидами (2%) могут быть отнесены к марке СФ, а при $S_v > 2\%$ — к марке СНЧ. Высокие значения $\operatorname{tg} \delta$ при $f=1$ кГц и низкие U_p дают пластинки с мелкими включениями сульфидов изометричной формы, образующие скопления или цепочки, а следовательно, имеющие небольшие изолирующие перемины между отдельными включениями.

Кроме влияния включений сульфидов на электрические свойства конденсаторной слюды как основного диэлектрика, рассматривалось влияние их на $\operatorname{tg} \delta$ защитной слюды ($d = 100 \div 210$ мкм). При $f=1$ МГц и S_v от 0,7 до 23,6% диэлектрические потери составляли не более $2,9 \cdot 10^{-4}$, если сульфиды представлены в виде одиночных включений или скоплений изометричной формы в центральной части пластинки. Включения сульфидов линейной формы, имеющие большую протяженность на пластинке и особенно выходящие за края электродов, при S_v от 0,7 до 10,4% увеличивают потери до $4,5 \div 5,0 \cdot 10^{-4}$.

Потери при $f=1$ кГц у чистых пластинок слюды марки СЗ равны $10,8 \cdot 10^{-4}$. В слюде, имеющей включения сульфидов, S_v от 0,7 до 23,6%, потери повышаются до $26 \cdot 10^{-4}$. Все испытанные пластинки с включениями сульфидов марки СЗ отвечают требованиям ГОСТа на конденсаторную слюду, в котором допускается $\operatorname{tg} \delta$ не выше $30 \cdot 10^{-4}$.

Проверка влияния слюды марки СЗ с включениями сульфидов на диэлектрические свойства конденсатора с основным

диэлектриком марки СО [14] показала, что включения не повысили $\text{tg } \delta$ более $10 \cdot 10^{-4}$ и соответствуют конденсаторам типа КСГ, СГМ и КСО (емкостью свыше 200 пф).

ОКИСЛЫ ЖЕЛЕЗА

Магнетит

Диагностика включений магнетита в мусковите месторождения Хетоламбино рентгеновским методом Дебая была проведена А. И. Сулоевым и Е. И. Самойловой [62].

Окраска магнетита зависит от толщины включения. В наиболее толстых пластинках он непрозрачен и обладает черным цветом, а в более тонких — коричневатым разной ин-



Рис. 17. Дендритовидные включения магнетита. Увел. 3.

тенсивности. Тонкие пленки (тыс. доли мм) в проходящем свете характеризуются сероватой окраской с зеленым, кремовым, розовым и другими оттенками в отличие от пирротина. В окраске магнетита обычно различается слабая зональность (рис. 17, 18 а, б). Центральная часть включения — черная, густо-коричневая, к периферии окраска светлеет до коричнево-серой и далее серой с разными оттенками. В отраженном свете при дневном освещении, что очень важно при диагностике, магнетит стально-серый, нередко с яркими зелеными, синими, розовыми цветами побежалости. В искусственном отраженном

свете, особенно при микроскопическом исследовании, магнетит фактически не отличается от пирротина, так как оба минерала имеют кремовую окраску. Сильная магнитность характеризующего включения легко устанавливается железной иглой (табл. 1).

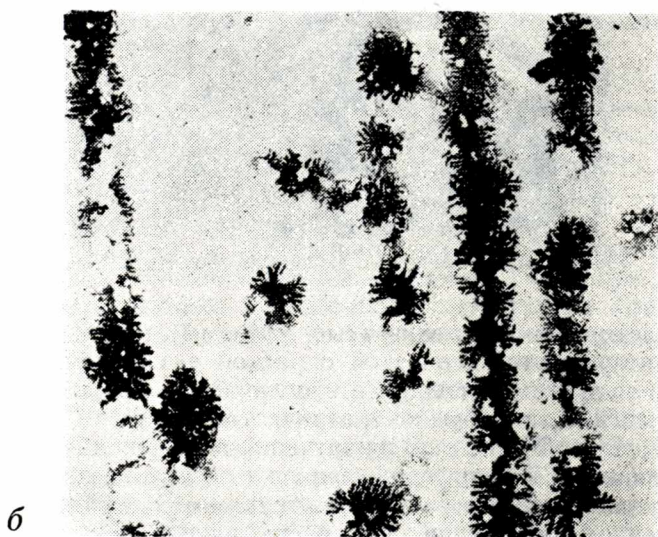
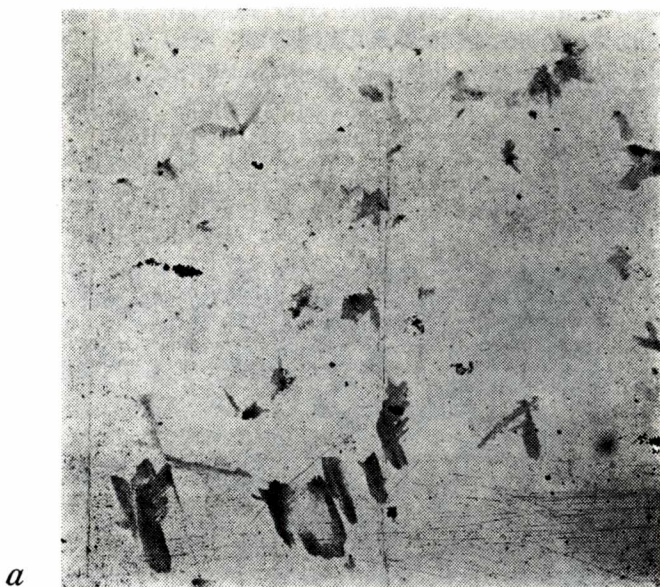


Рис. 18. Включения магнетита:
a — дендритовидные в виде сыпи, увел. 7; *б* — снежинковидные в виде скопления, увел. 4.

Форма включений магнетита в слюде своеобразная и совершенно отличается от формы включений сульфидов. Преимущественно это прямолинейные дендритовидные полосы (рис. 17, 19) шириной до 15—20 мм, пересекающиеся друг с другом под углом 30° и ориентированные согласно несовершенной спайности мусковита. В этих полосах различается центральная линия, от которой по обе стороны отрастают дендриты (рис. 17, 18 б). При микроскопическом наблюдении устанавливается незначительная асимметричность в дендритах

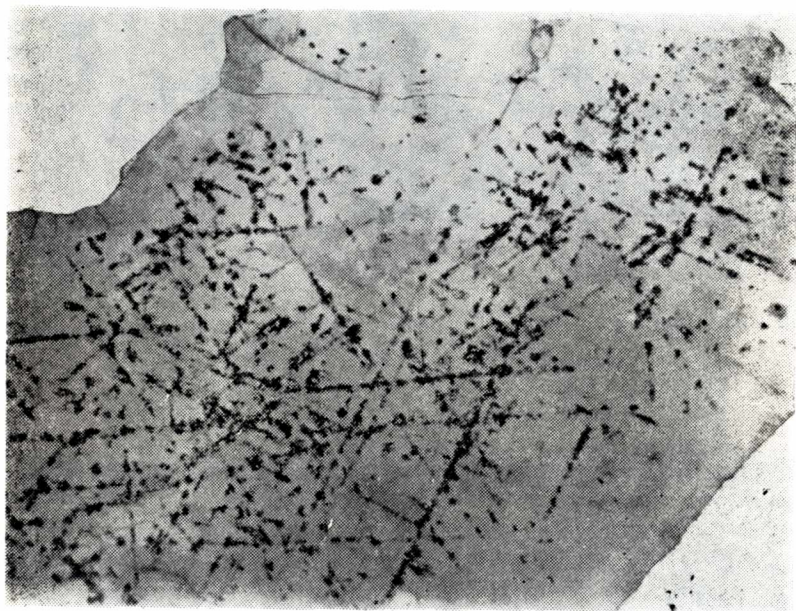


Рис. 19. Закономерно ориентированное расположение дендритовидных полос магнетита. Натур. велич.

и различаются детали шестигранников и квадратов. Придерживаясь взглядов Д. П. Григорьева на происхождение дендритов путем кристаллизации вещества в сильно стесненных условиях и учитывая закономерное их расположение, можно считать, что магнетитовые дендриты образовались в скрытых трещинах несовершенной спайности мусковита. Видимо, эти трещины имеет в виду В. Д. Никитин [48], говоря при описании включений магнетита о «соответствующей сетке полостей нарушения сплошности кристаллов мусковита».

Расположение в кристалле слюды включений магнетита и их содержание различны. Внутренняя часть пластинок мусковита, особенно из пробы месторождения Хетолам-

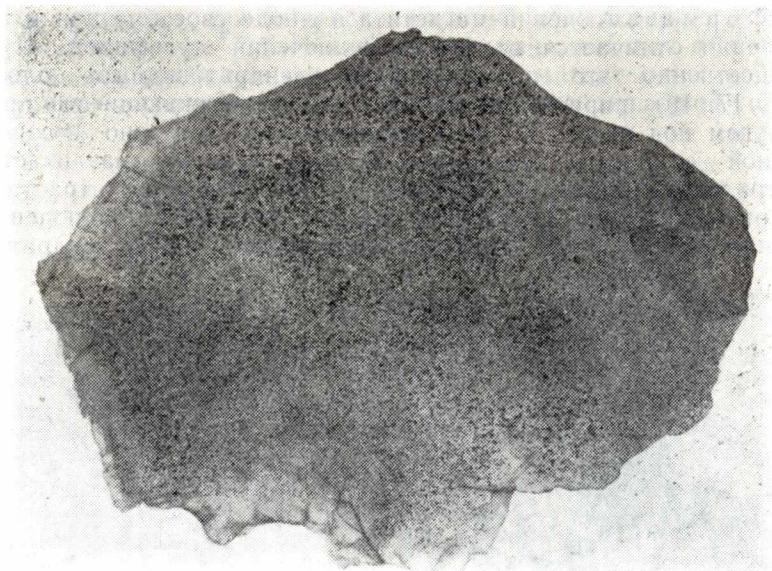


Рис. 20. Снежинковидные включения магнетита и гематита в виде равномерной сыпи. Увел. 1,5.

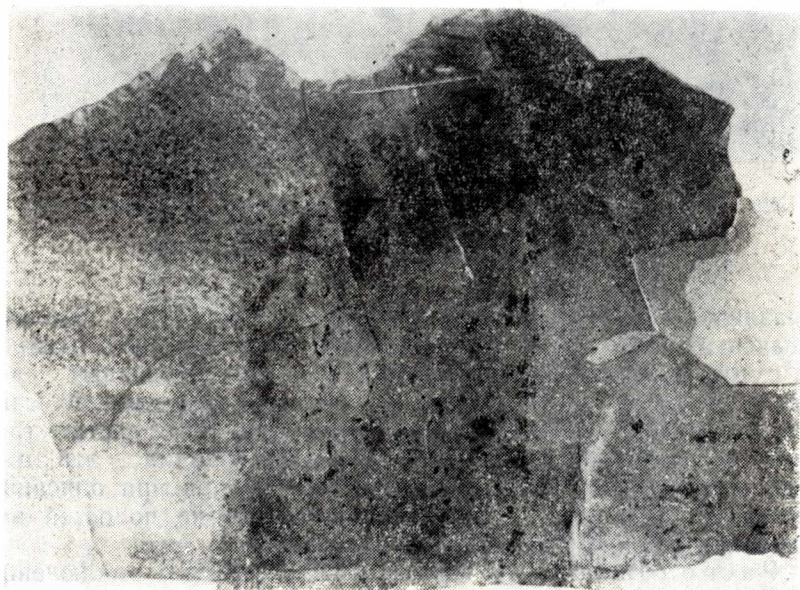


Рис. 21. Зональное расположение включений магнетита. Увел. 2.

бино, обычно выполнена закономерно ориентированными дендритовидными полосами магнетита; чистой остается неширокая краевая зона (рис. 19). Значительно реже встречаются таблички мусковита, в которых вся внутренняя часть заполнена равномерной сыпью точечных снежинковидных включений магнетита, а узкая (2—3 мм) периферическая зона содержит его единичные кристаллики (рис. 20). Иногда включения магнетита образуют зональность; внутренняя часть грани (001) в виде неполного шестиугольника насыщена микроскопическими и в меньшем количестве относительно крупными включениями магнетита; затем следует ельчатая кайма, вдоль рубцов которой — микроточки магнетита, а в промежутках — более крупные включения и выше их концентрация (рис. 21). Последний факт В. Д. Никитин [48], Б. Е. Карский, А. И. Тол-

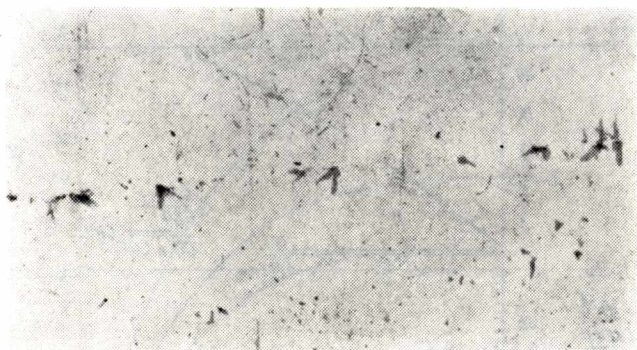


Рис. 22. Дендритовидные включения магнетита в виде цепочки. Увел. 7.

стой (устное сообщение) и др. объясняют выщелачиванием окислов железа из рубцов ельчатости при гидротермальных процессах. Встречаются кристаллы мусковита с зональностью, обусловленной количественным содержанием включений: внутри — густая сыпь магнетита, в краевой зоне — его редкая вкрапленность. Такое же расположение включений магнетита устанавливается и в зонально окрашенных кристаллах мусковита. При подколке разных табличек слюды было обнаружено, что характер распределения магнетита и его содержание в пластинках непостоянно. Четкое зональное расположение сменяется на пятнистое, а единичные включения — иногда густой сыпью или сеткой дендритовидных и снежинковидных полос, а также цепочек (рис. 18 а, б, 22).

В исследованных пробах выход колотых подборов с включениями магнетита составляет до 0,5, а в калиброванных подборах до 0,4% от промышленного сырца.

Влияние включений магнетита на электрические характеристики мусковита. Включения магнетита, относящегося к полупроводникам, имеют ϵ_v и ρ_v близкие сульфидам (табл. 2), поэтому эти включения влияют на элек-

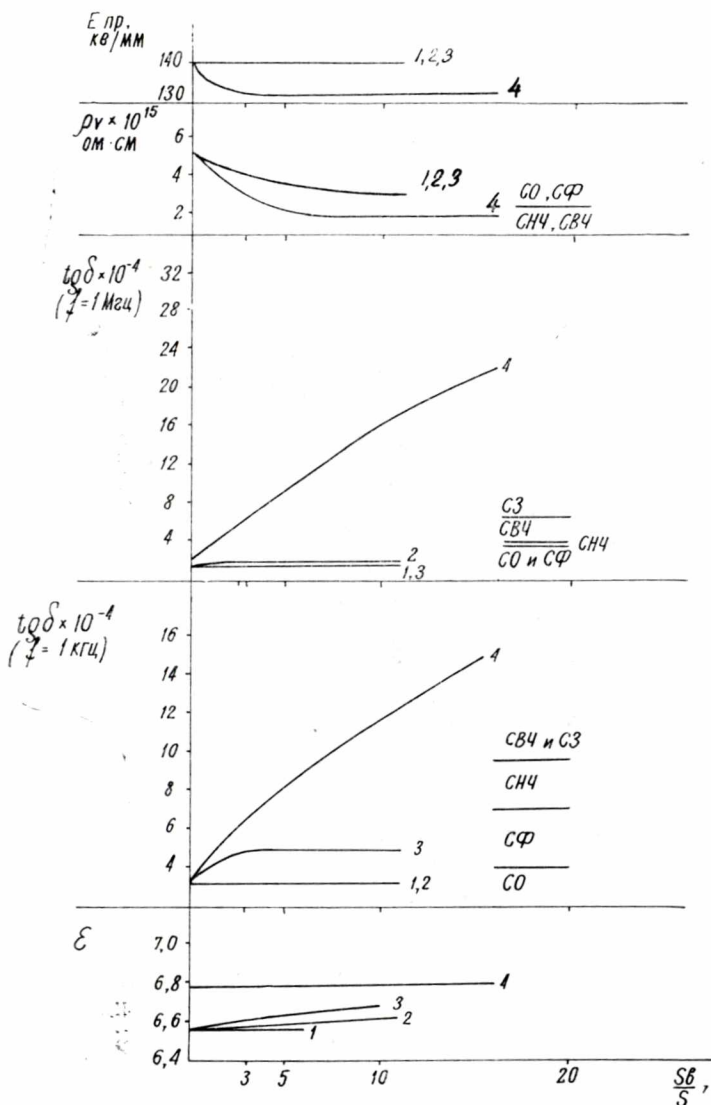


Рис. 23. Влияние распределения и формы включений магнетита на электрические свойства.

Свежинковидные: 1 — спорадические, 2 — сыпь, 3 — цепочки, 4 — дендритовидные линейно-вытянутые, одиночные (месторождение Карельское).

трические свойства мусковита (ϵ , ТКЕ, $\text{tg } \delta$, $E_{\text{пр}}$, U_p) аналогичным образом. Но поскольку в мусковите месторождений Малиновая Варакка и Тэдино включений магнетита мало и в основном в виде мелких снежинковидных пленок, то при их содержании, одинаковом с сульфидами, влияние магнетита на электрические свойства незначительно. Так, по значению $\text{tg } \delta$ эти

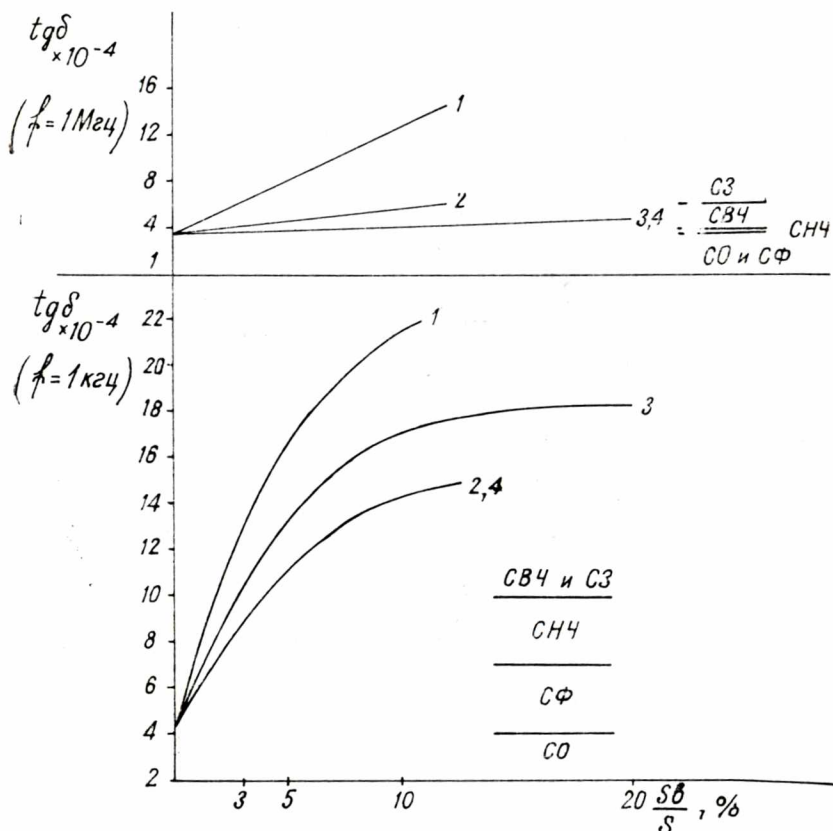


Рис. 24. Влияние распределения включений дендритовидного магнетита на диэлектрические потери (месторождение Хетоламбино):

1 — линейно-вытянутые одиночные, 2 — одиночные, 3 — скопления, 4 — цепочки.

включения (рис. 23) могут быть сравнимы с ихтиоглиптовидными включениями сульфидов. По средним значениям потерь снежинковидные включения магнетита точечных размеров, спорадически распределенные по пластинке, соответствуют марке CO. Анализ всех измерений показал, что при содержании магнетита до 3% марке CO соответствует 80% пластинок при

$f=1$ кГц и при 1 МГц—88%. По этому же показателю мусковит с включениями сульфидов проходит в марку СО в очень малом количестве.

Дендритовидные включения магнетита линейно-вытянутого облика в мусковите (месторождение Карельское) увеличивают потери по сравнению со снежинковидными включениями (месторождение Тэдино) в 3 раза при S_v до 3% и в 4,5 раза — при S_v до 5% ($f=1$ МГц). Такое же содержание дендритовидных включений магнетита увеличивает $\operatorname{tg} \delta$ до 1,5 раза при $f=1$ кГц. При данной частоте эти включения могут быть сравнимы с одиночными линейными и изометричными включениями сульфидов, а при $f=1$ МГц даже значительно их превышают.

Дендритовидные включения магнетита в мусковите месторождения Хетоламбино ведут себя в электрическом поле подобно аналогичным включениям месторождения Карельское (рис. 23, 24). По $\operatorname{tg} \delta$ при $f=1$ МГц пластинки мусковита без включений месторождения Хетоламбино могут быть использованы только в марках СНЧ и СВЧ. Высокие потери у пластинок без видимых включений вызваны повышенным содержанием трехвалентного железа [1, 71] в структуре мусковита по сравнению со слюдой месторождений Малиновая Баракка, Тэдино и Карельское. Мусковит этого месторождения с одиночными включениями магнетита может быть использован для марки СВЧ. Цепочечное расположение дендритовидных включений магнетита (рис. 23) приводит к увеличению потерь по сравнению со спорадическим (рис. 24). Линейно-вытянутые включения, создавая проводящие каналы внутри слоев мусковита еще больше увеличивают потери. Мусковит с этим видом включений может быть использован только для марки СЗ. При $f=1$ кГц пластинки с включениями магнетита, образующими цепочки, по $\operatorname{tg} \delta$ соответствуют марке СФ конденсаторной слюды.

Экспериментальная зависимость ρ мусковита от содержания включений магнетита близка аналогичной зависимости для включений сульфидов и расчетам (рис. 3, 14, 23). По средним показателям мусковит с магнетитовыми включениями отвечает маркам СО и СФ. Анализ всех проведенных измерений показывает, что 80% пластинок с магнетитом снежинковидной формы, расположенных спорадически, в виде сыпи и небольших цепочек, отвечает марке СО (пробы месторождения Малиновая Баракка).

Пластины с включениями магнетита выдержали испытание переменным напряжением в течение 10 сек. Напряжение пробоя этих же образцов в парафине не изменяется в случае снежинковидных включений и незначительно снижается при дендритовидном линейно-вытянутом магнетите с увеличением их содержания.

Включения полупроводников в мусковите (магнетита и сульфидов) в поле переменного тока частотой 50 Гц и ниже и напряжении до 4 кВ, приложенном вдоль плоскости совершенной спайности, вызывают искрение на остриях включений (особенно дендритовидной, снежинковидной, шестиугольной формы), между включениями или между трещинами отдельностей. Искрение появляется и в случае перекрытия включения

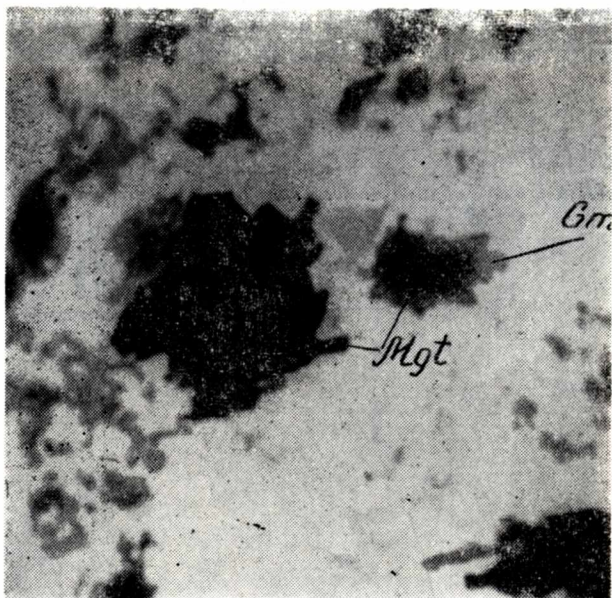


Рис. 25. Включения магнетита (Mgt) и гематита (Gm).
Увел. 60.

слюдой толщиной до 100 мкм. Это может служить диагностическим признаком для проводящих ток включений [19]. Напряжение поверхностного разряда мусковита с такими включениями низкое, особенно при размерах включений, составляющих более половины расстояния между электродами (рис. 5, 15). По характеру зависимости U_p от величины включения вдоль приложенного поля для мусковита с магнетитом и сульфидами близки. Мусковит с включениями этих видов размером 8 мм и более имеет U_p ниже 6 кВ, что недопустимо даже для щипаной слюды, используемой в производстве клееной изоляции [19].

Степень концентрации включений магнетита влияет на U_p . Скопления магнетита в мусковите понижают напряжение разряда от 0,3 до 0,7, а цепочки — до 0,3—0,9 кВ по сравнению со спорадическим его расположением. Поверхностные включения магнетита понижают значения напряжения поверхностного

разряда по сравнению с расположением их между слоями в мусковите, что соответствует влиянию проводящих имитированных «включений» на этот показатель (рис. 6).

Гематит

Включения гематита красного цвета наблюдаются в виде псевдоморфоз по магнетиту в хетолабинском мусковите (рис. 25) и реже — по пириту в малинововараккской слюде, главным образом жилы № 183. Иногда гематит образует самостоя-

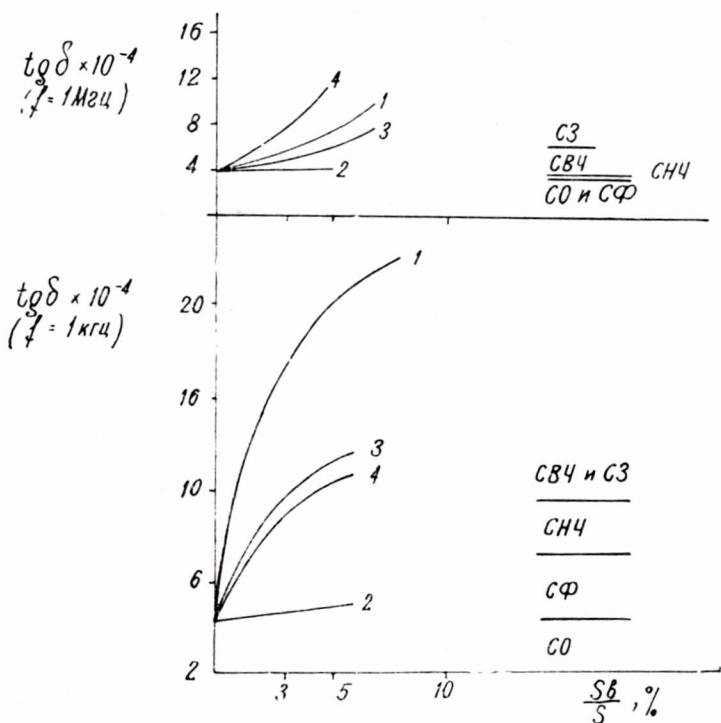


Рис. 26. Влияние включений гематита на диэлектрические потери мусковита (месторождение Хетолабино):

1 — одиночные вытянутые неправильной формы, часто с магнетитом в виде микровключений; 2 — одиночные неправильной формы, 3 — скопления, 4 — цепочки.

тельные концентрически-зональные агрегаты, обычно располагающиеся в периферической зоне кристаллов мусковита кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности.

Включение гематита ($\epsilon_v = 25$, $\rho_v = 10^2 \div 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) в мусковите (месторождения Хетолабино), подобно включениям магнетита, влияют на его электрические свойства (рис. 26).

ГИДРООКИСЛЫ ЖЕЛЕЗА

Гидроокислы железа наиболее широко освещены в работах Э. Я. Гурьевой [24], согласно описаниям которой авторы диагностировали эти включения как гетиты-гидрогетиты и лимониты. В исследованном мусковите кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности в породах разных структурно-минеральных ассоциаций гидроокислы железа встречались редко. Они представлены желтоватыми, желто-бурыми землистыми налетами, пятнами, натечными агрегатами (рис. 27)



Рис. 27. Включения гидроокислов железа (налеты, пятна). Увел. 3.

и реже кристаллами-псевдоморфозами по сульфидам, биотиту, хлориту. Включения псевдоморфоз характеризуются соответствующими формами замещенных минералов, описание которых было дано выше. Иногда встречаются радиально-лучистые, игольчатые, сноповидные агрегаты и концентрически-зональные сферолиты гетита-гидрогетита самостоятельной кристаллизации.

Гидроокислы железа в виде единичных мелких кристаллов, иногда агрегатов обычно наблюдаются в краевой зоне табличек мусковита, не подвергшегося значительным гидротермальным изменениям. Крупные образования гидроокислов железа устанавливаются в кристаллах мусковита, сильно расслоенных

по спайности, осветленных и частично потерявших гибкость, и в других дефектных участках слюды.

Влияние включений гидроокислов железа на электрические свойства мусковита. Диэлектрическая проницаемость мусковита с гидроокислами железа, представленными гетитом с $\epsilon_v = 10-11$ и в основном лимони-

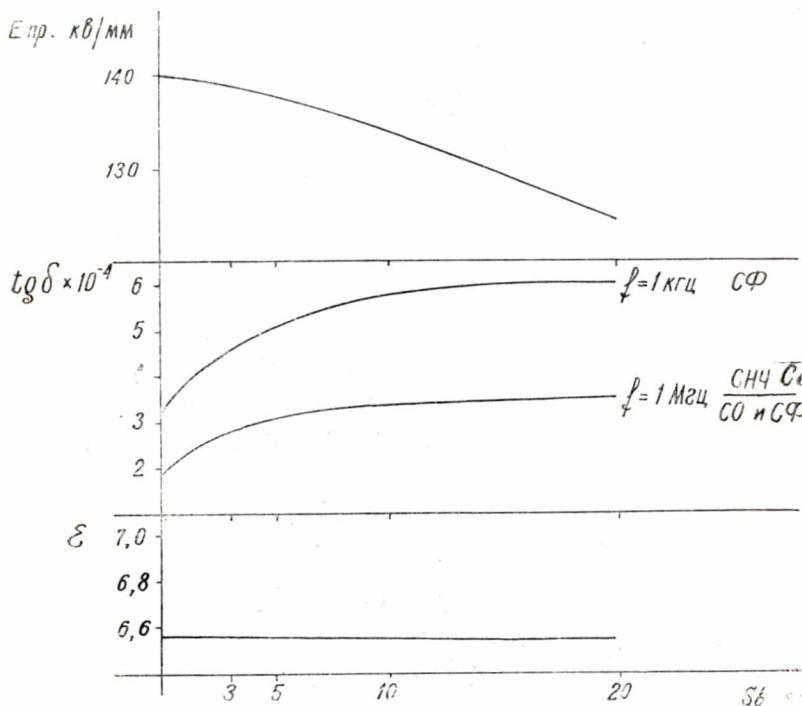


Рис. 28. Влияние включений гидроокислов железа на электрические свойства.

том с $\epsilon_v = 3,2$ (табл. 2), показана на рис. 28. С увеличением содержания гидроокислов железа ϵ мусковита снижается незначительно, даже при $S_v = 20\%$. Высокое содержание гидроокислов железа, представленных тонкими землистыми налетами и натечными агрегатами, расположенными в виде скоплений на поверхности испытываемой пластинки, мало влияют на ϵ мусковита. Наличие этих включений увеличивает емкость мусковитовой пластинки с ростом температуры до 70° . ТКЕ таких пластинок составляет от 34 до $71 \cdot 10^{-6}$ град. $^{-1}$

Диэлектрические потери при $f = 1 \text{ кГц}$ соответствуют марке СО при S_v до 1,5% гидроокислов железа в мусковите, при $S_v > 1,5\%$ мусковит соответствует марке СФ (рис. 28). При

$f=1$ МГц и $S_v=5\%$ мусковит с гидроокислами железа по $\text{tg } \delta$ может быть использован в марке СО и СФ, а при $S_v>5\%$ до 20% — в марке СНЧ. В целом потери меньше, чем у мусковита с включениями сульфидов и магнетита.

Характер изменения $E_{\text{пр}}$ от S_v почти аналогичен мусковиту с включениями сульфидов, также расположенных на поверхности. Снижение $E_{\text{пр}}$ объясняется преимущественно поверхностным распределением гидроокислов на пластинке и большим количеством газа, сопровождающего включения, если они находятся между слоями мусковита.

При небольших размерах включений ($l=2-5$ мм) U_p мусковита близко к значению U_p мусковита с магнетитом и сульфидами (рис. 15). При $l=5$ мм гидроокислы железа мало влияют на U_p . Одиночные включения гидроокислов железа при $l=2-3$ мм снижают U_p на $12,5\%$ по сравнению с чистым мусковитом, при $l=10$ мм U_p снижается на $15,6\%$. Гидроокислы железа в виде скоплений снижают U_p меньше, чем одиночные, т. е. при $l=2-3$ мм U_p понижается на $9,4\%$, при $l=8-10$ мм — на $13,5\%$.

СИЛИКАТЫ

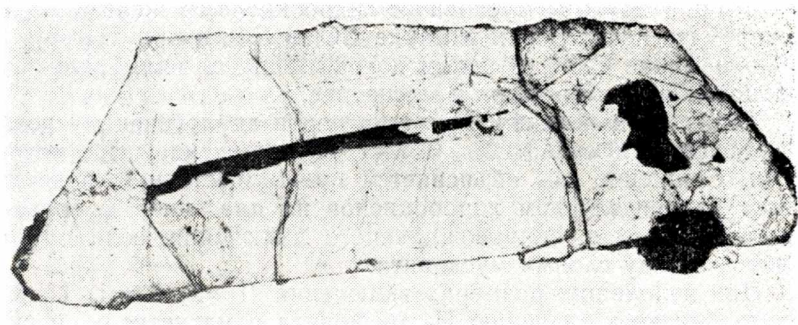
Биотит

Включения биотита в мусковите визуальнo и микроскопически определяются главным образом в проходящем свете по типичной коричневой или зеленовато-коричневой окраске, интенсивность которой зависит от толщины включений.

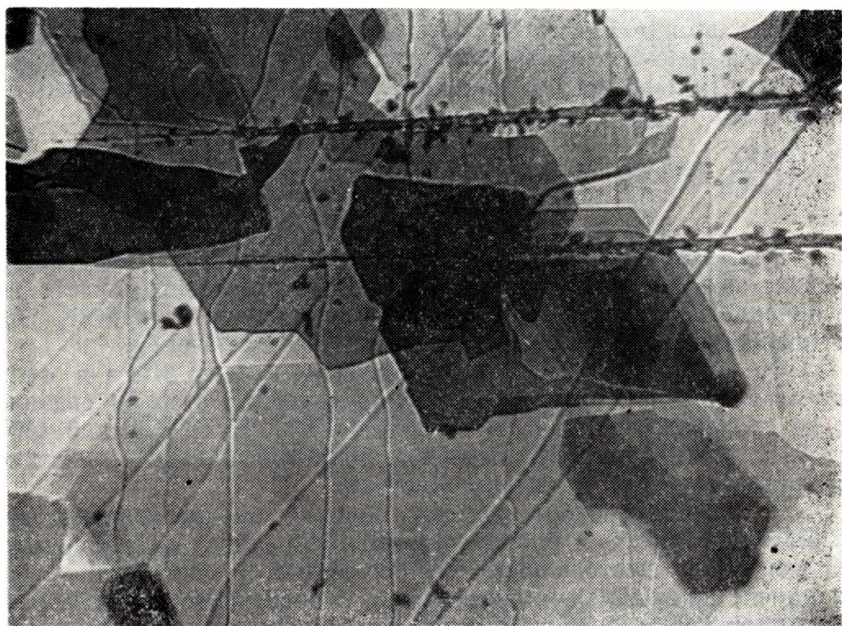
Форма и размеры включений биотита в мусковите разнообразные, что в определенной степени связано с их происхождением. Е. Д. Белянкина [1], Б. Е. Карский [30] и А. С. Никаноров [46] выделяют реликтовые, сингенетические и эпигенетические включения биотита.

В мусковите некоторых жил широко распространены реликтовые включения биотита [1, 46]. Они имеют лейстовидные, ступенчатые, шестигранные, полосовидные, ихтиоглиптовидные и прочие неправильные очертания и относительно крупные размеры (рис. 29 а, б, в, г; 30 а, б). Из реликтовых включений широко распространены в мусковите мельчайшие листочки биотита, включающего микрозернышки циркона, монацита или других радиоактивных минералов, с типичным вокруг них плеохроическим ореолом (рис. 30 в). Бурый до черного ореол возникает благодаря воздействию радиоактивных акцессорных примесей, имеющихся в составе включений. Поскольку облик радиоактивных минералов не пластинчатый, а близкий к изометрическому, и включение не находится в прорастании с мусковитом, то при подколке оно обычно выпадает, оставляя в слюде микроскопическое отверстие. Последнее и служит причиной «прокола» пластинок мусковита при электрических испытаниях.

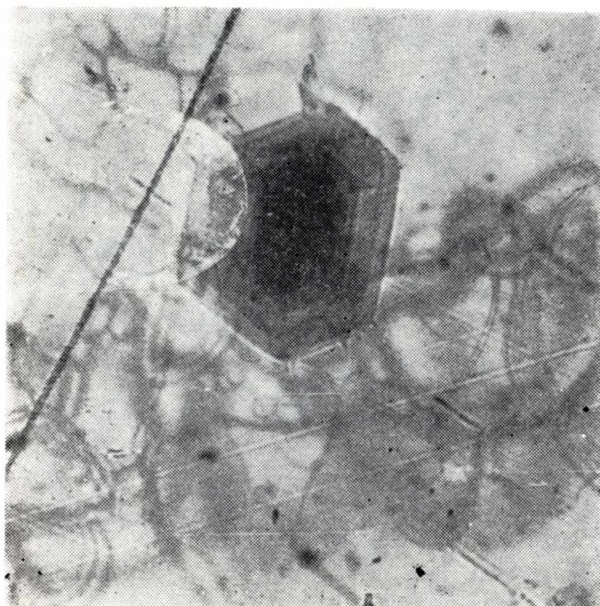
а



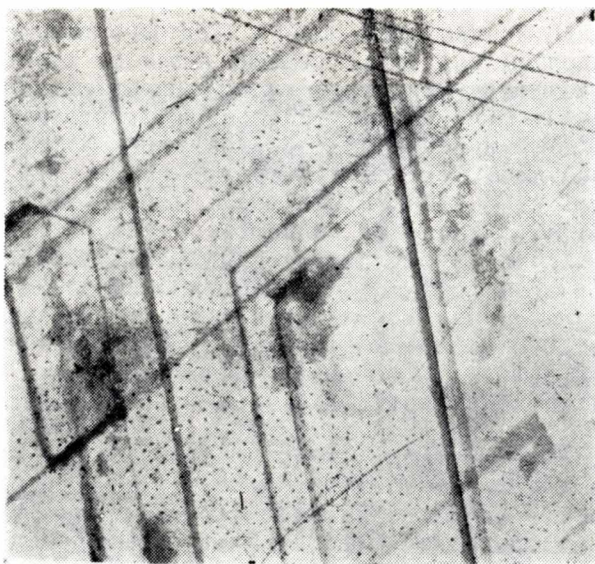
б



Помимо реликтовых, в мусковите распространены сингенетические включения биотита [46]. Преимущественно это звездчатые, ромбовидные, шестигранные, ступенчатые и неправильные пленки биотита от микроскопических до точечных размеров. Включения биотита удлиненного облика нередко ориентированы взаимно параллельно и относительно главного луча фигуры удара направлены под углом кратным 30° . Часто сингенетические включения биотита находятся во внутренней зоне кристаллов мусковита в ассоциации с газовыми пузырьками (рис. 31а). Обычно их скопление имеет шестигранные или



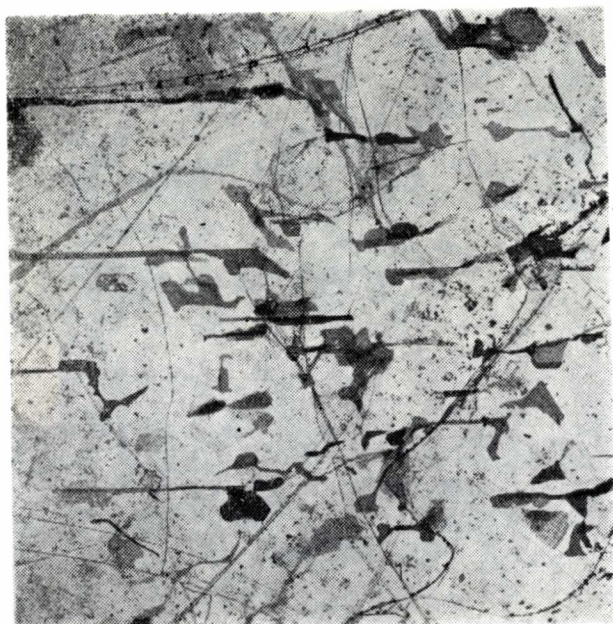
в



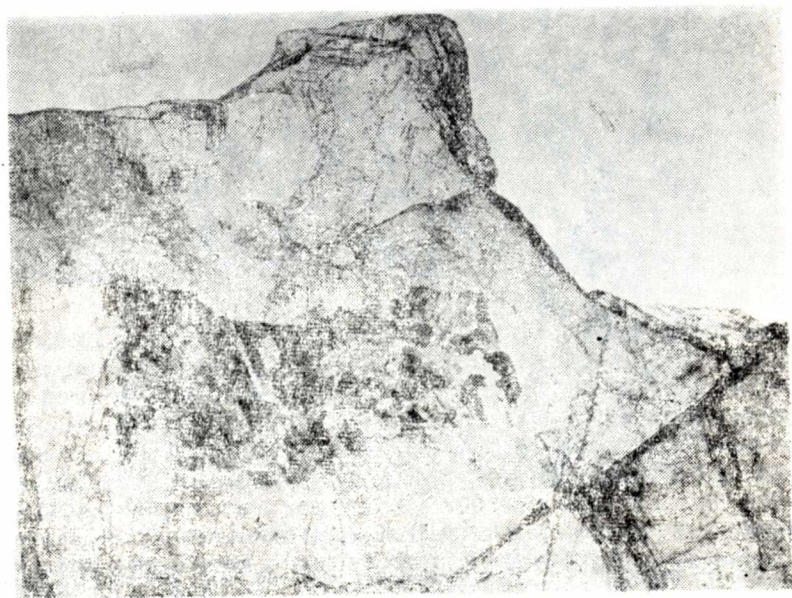
г

Рис. 29. Включения биотита:

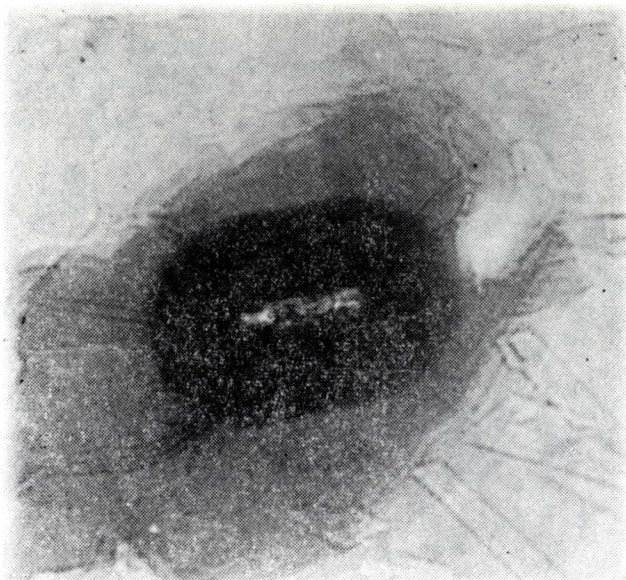
а — лейстовидные, увел. 2; *б* — ступенчатовидные и неправильной формы, увел. 60; *в* — шестигранное с изохроматическими кольцами газа, увел. 75; *г* — полосовидные, увел. 1,5.



a



б



в

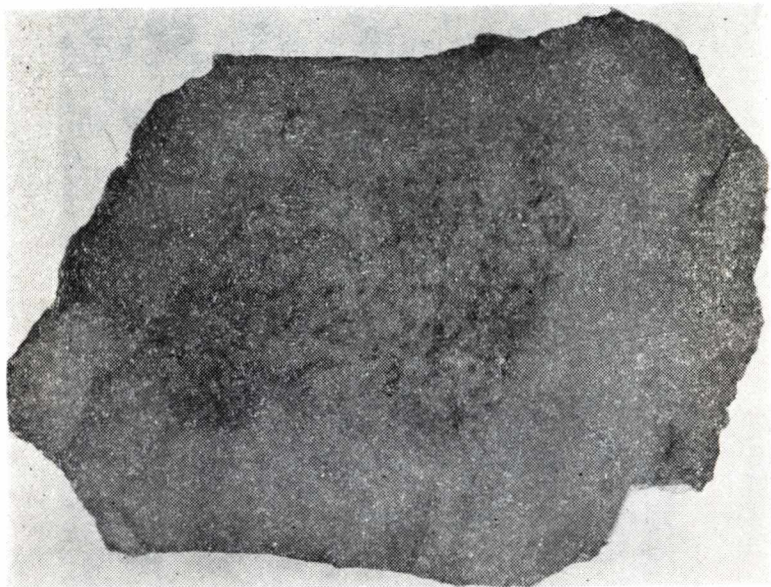
Рис. 30. Включения биотита:

а — ихтиоглиптовидные, увел. 20; б — различные формы, увел. 8;
в — с цирконом, увел. 100.

неправильные очертания и различные размеры. Иногда оно распространено по всему объему кристалла мусковита. Количественное соотношение биотита и газовых включений в скоплении непостоянное, но в большинстве образцов мусковита из включений в указанной ассоциации преобладают газовые. В качестве примеси среди них иногда устанавливаются сульфиды — пирротин, пирит и более крупные листочки биотита. Окраска мусковита в этой части кристаллов обычно неоднородная. Характерна также повышенная деформированность, т. е. помятость и тонкая трещиноватость мусковита, обуславливающие сильную зажимистость слюды. С данной ассоциацией включений биотита и газа, как известно, обычно связана ельчатость мусковита, вдоль которой находятся сульфиды. Указанные дефекты нередко поражают кристалл на всю его толщину.

В мусковите встречаются скопления мелкого биотита и газовых включений несколько иного характера. Это звездчатые и веретеновидные пленки биотита, известные в литературе как новообразованные включения [30], они ориентированы параллельно друг другу и под углом кратным 30° к главному лучу фигуры удара (рис. 32 а, б). Как правило, мусковит в участках их расположения осветлен до серого цвета. Осветленные участки мусковита вокруг включений биотита имеют пониженное содержание

a



б

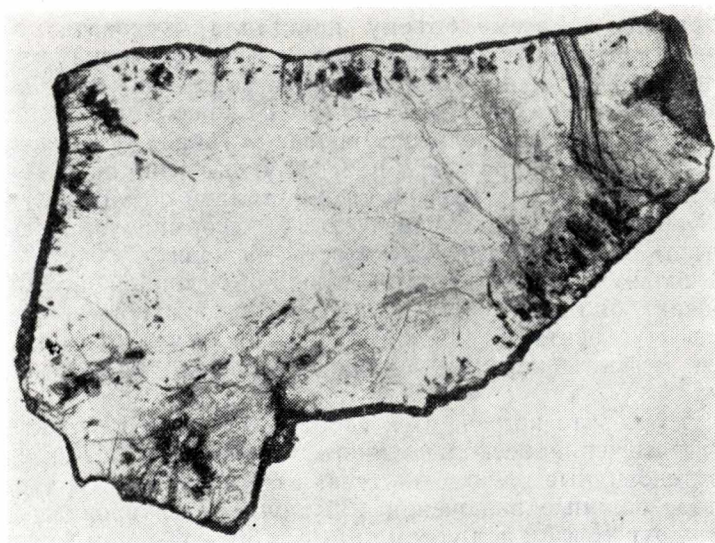


Рис. 31. Включения биотита:
a — в центре кристалла сопровождаются газом, натур. велич.; *б* — в краевой
зоне, увел. 3.



a



б

Рис. 32. Включения биотита:
a — звездчатые, увел. 20; *б* — веретеновидные, увел. 20.

железа до 1,5% (у мусковита той же пластинки содержание железа 1,8%). Анализ выполнен на микроанализаторе в режиме 20 кВ, 25 мА на образце, напыленном медью; эталон Fe — металлический, поправка на поглощение Z. В отличие от сингенетических включений биотита в ассоциации с газом, эти скопления занимают малую площадь и по толщине кристалла мусковита распространяются на доли миллиметра. Признаки деформированности на характеризуемых участках не устанавливаются, поэтому мусковит легко подкалывается.

Расположены включения биотита в любой части кристалла мусковита, в том числе по зонам его роста и полосам ельчатости. Реликтовые включения биотита с микрозернами радиоактивных минералов встречаются спорадически или образуют довольно равномерную, иногда густую сыпь на значительной части кристалла слюды. Относительно крупные реликты биотита располагаются в мусковите повсеместно (рис. 30 б). Как показали наблюдения, в пространственной ассоциации с включениями биотита встречаются сульфиды; при этом нередко в большей части пластинок одного кристалла мусковита в основном отмечается биотит, в остальных — могут преобладать сульфиды. Но, как правило, мелкие сингенетические включения биотита с газом находятся во внутренней зоне кристаллов слюды (рис. 31 а), нередко они тяготеют к периферии (рис. 31 б). Мелкие новообразованные пленки биотита с газом размещаются в любой части кристалла.

Содержание колотых подборок с включениями биотита на полезной площади в изученных пробах составляет от 8,2 до 50,2% (от промышленного сырца), т. е. высокое по сравнению с содержанием чистых подборок (11,8—57,0%). Наибольшее количество указанных подборок получено из мусковита кварц-мусковитового комплекса, ассоциирующего с биотитом. Выход калиброванных подборок с включениями биотита от промышленного сырца составляет от 0,5 до 7,0% для жил III типа месторождения Тэдино и от 0 до 18% для жилы IV типа месторождения Малиновья Варакка.

Влияние включений биотита на электрические свойства мусковита. Кристаллы биотита из жилы № 183 месторождения Малиновья Варакка с химическим составом $\text{SiO}_2 = 34,68$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,05$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,61$; $\text{FeO} = 17,96$; $\text{MnO} = 0,29$; $\text{MgO} = 7,89$; $\text{K}_2\text{O} = 8,48$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,28\%$ имеют $\varepsilon = 5,92$, $\rho_{\text{в}} = 5,2 \cdot 10^{13}$ Ом·см, $\text{tg } \delta = 1,7 \cdot 10^{-2}$ ($f = 1$ кГц), $\text{tg } \delta = 9,3 \cdot 10^{-4}$ ($f = 1$ МГц). Сингенетические и новообразованные микровключения биотита в мусковите этой жилы веретеновидной и звездчатой формы содержат железа 16,7% (микроанализ). Сравнивая содержание железа, можно предположить, что биотит-включение должен иметь диэлектрические показатели, близкие таблитчатому биотиту, т. е. более низкие по сравнению с мусковитом. В этом случае, как видно из первой главы, включения

биотита понижают электрические показатели мусковита. Экспериментальная работа доказала, что это справедливо для сингенетических (рис. 33) и новообразованных включений биотита. У мусковита с указанными включениями снижается диэлектрическая проницаемость, растут потери.

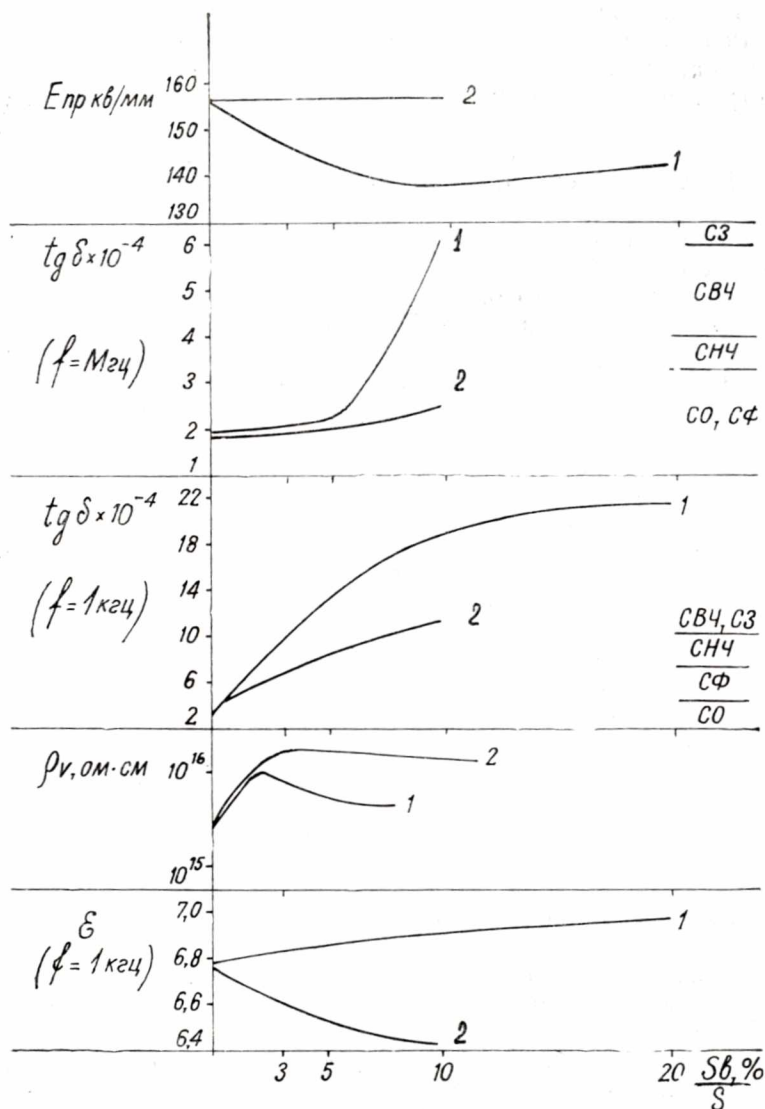


Рис. 33. Влияние включений реликтового (1), сингенетического биотита (2) на электрические свойства.

На снижение ϵ большое влияние оказывают газовые включения, сопровождающие сингенетические и новообразованные биотитовые включения, площадь газовых включений в данном случае не учитывалась. Измерения показали, что 2,3% испытанных пластинок с включениями биотита с S_b до 3% и 10% пластинок с S_b до 5% не соответствуют ГОСТу [18], хотя средние показатели $\epsilon > 6$.

Реликтовые включения биотита в мусковите, особенно с радиоактивным минералом, оказывают другое влияние на электрические свойства: так, ϵ_b мусковита с этим видом включений превышает ϵ_c чистого мусковита (рис. 30в). Причем с увеличением занимаемой включениями площади ϵ увеличивается. Рост ϵ у мусковита с реликтовыми включениями биотита, видимо, связан с наличием в биотитовых включениях микрозерен радиоактивного минерала, имеющего высокие значения $\epsilon = 8-33,7$ [49, 63].

Мусковит с биотитом обладает высокой стабильностью емкости при температуре до $+70^\circ\text{C}$ (выше, чем у мусковита без включений). С увеличением S_b до 20% стабильность емкости мусковита с биотитом растет (ТКЕ стремится к нулю), что говорит о высокой стойкости биотита при изменении температуры.

Удельное объемное сопротивление у мусковита с биотитовыми включениями высокое. Рассматриваемые образцы с содержанием биотита до 10% соответствуют значениям ГОСТа на конденсаторную слюду марок СО и СФ. Наибольшие значения ρ мусковита дают пластинки с включениями сингенетического и новообразованного биотита даже несмотря на то, что включения биотита распространены по всей пластинке ($S_b \approx 70\%$). Высокие значения ρ для мусковита с биотитом могут быть объяснены сопутствующими биотиту газовыми включениями с ρ до $10^{16} \div 10^{20}$ Ом·см. Реликтовые включения биотита с такими же содержаниями в мусковите снижают ρ мусковита по сравнению с сингенетическими включениями на 1—2 порядка при $S_b = 3-5\%$.

Наиболее чувствителен к изменению площади, занимаемой включениями, $\text{tg } \delta$, особенно при $f = 1$ кГц. Это объясняется тем, что включения биотита распространяются на большую часть, иногда на всю толщину пластинки мусковита и создают в диэлектрике проводящий канал. Вероятность таких каналов с увеличением площади, занимаемой включением, увеличивается, поэтому пластинки с включениями биотита на низкой частоте имеют потери выше, чем мусковит с рудными включениями. Включения в мусковите создают дополнительные потери в диэлектрике и снижают выход наиболее качественных марок конденсаторной слюды. По показателю $\text{tg}_{\text{ср}} \delta$ при $f = 1$ кГц в марке СО не допускаются реликтовые включения биотита (рис. 33). При содержании его до 3% мусковит по значению

потерь соответствует только марке СНЧ. Включения сингенетического и новообразованного биотита значительно меньше влияют на потери: при S_v до 3% мусковит может быть отнесен к марке СФ, при 5% — к СНЧ.

При частоте 1 МГц диэлектрические потери у пластинок мусковита с включениями сингенетического и новообразованного биотита до 10% низкие, и такая слюда соответствует марке СО и СФ. Следовательно, у мусковита с включениями реликтового биотита потери выше. Пластинки с содержанием S_v до 5% реликтовых включений биотита соответствуют СО, при S_v до 10% — марке СВЧ.

При низком (особенно до 3%) или высоком содержании биотита, но в виде небольших по размеру включений (сыпи или редкой цепочки сингенетического и новообразованного биотита) влияние его на электрические свойства мусковита небольшое. Одиночные включения изометричной формы (реликтовые и сингенетические), но больших размеров, а также линейно-вытянутые и мелкие включения сильно сконцентрированные (сингенетические и новообразованные) увеличивают потери.

Все рассматриваемые пластины биотита выдержали испытание переменным напряжением при $f=50$ Гц в течение 10 сек. Электрическая прочность этих пластинок высокая. Но с увеличением содержания реликтовых включений $E_{пр}$ уменьшается до 140 кВ/мм (рис. 33). По этому показателю включения биотита близки рудным. Сингенетические и новообразованные включения биотита не ухудшают электрической прочности мусковита. Напряжение поверхностного разряда U_p у мусковита с включениями биотита ниже, чем у чистого, но выше, чем у мусковита с рудными включениями (рис. 15). С увеличением только размера включения биотита от 1 до 10 мм (в направлении приложения электрического поля) U_p падает от 9,3 до 7,0 кВ. Включения биотита в виде скоплений ($l=2-3$ мм) снижают U_p в два раза меньше, чем одиночные изометричные включения таких же размеров.

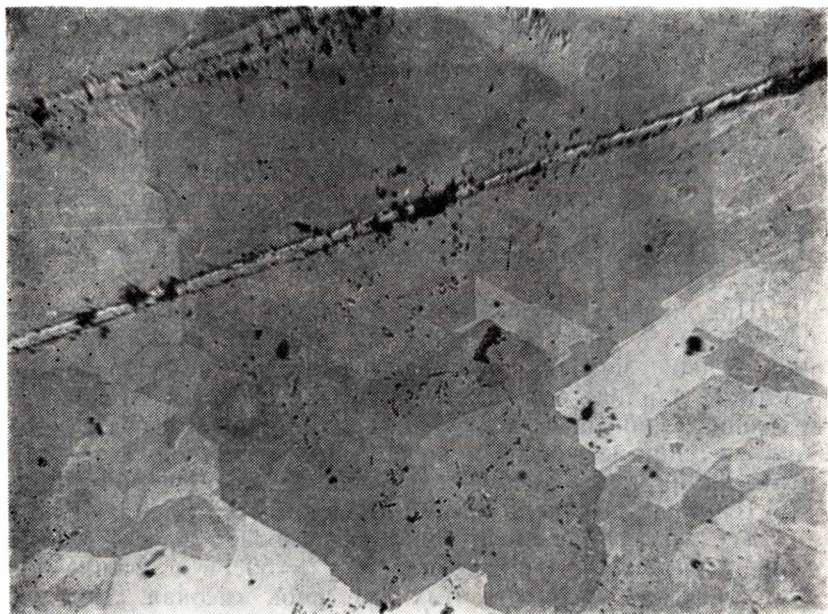
Хлориты

Включения хлоритов в мусковите впервые были диагностированы А. К. Решетниковой рентгеноскопически и методами микрохимического, спектрального анализов. В работе [52] приведена предполагаемая кристаллохимическая формула хлорита



Окраска. Включения хлоритов распространены в мусковите в виде листочков, пленок, тонкочешуйчатых налетов разной формы и величины, характеризующихся зеленым цветом. В процессе детального исследования включения хлоритов разделились на две разности, отличающиеся по окраске, отчасти

a



б



Рис. 34. Включения хлорита:
a — шестигранные, увел. 15; *б* — концентрически-зональные, увел. 10.

форме, показателю преломления n_m и влиянию этих разностей на электрические свойства мусковита.

Хлориты зеленого цвета, представленные листочками, пленками, реже налетами правильных «геометрических» очертаний (рис. 34 а), по кривой зависимости n_m от железистости имеют $F=7-75$ ат. % [31]. Количественный анализ (табл. 8) включений хлорита зеленоватого цвета, выполненный на лазерном микроанализаторе типа LMA-1, показал общую железистость — 73%. По этим определениям зеленые хлориты близки к группе магнезиально-железистых хлоритов по классификации В. П. Ивановой [26], их предполагаемая кристаллохимическая формула может быть представлена в виде



Таблица 8

Химический состав включений хлорита, %

Элементы	Образец 1		Образец 2	
	мусковит	включения хлорита	мусковит	включения хлорита
Fe	1,7	21,4	1,75	21,5
Al	18,9	11,4	18,6	10,0
K	5,9	0,01	6,2	0,38
Si	24,3	12,8	24,4	14,5
Mg	0,6	7,7	0,95	8,0
Mn	0,0	1,2	0,0	0,35
Ti	0,35	0,15	0,1	0,1

Сероватые и белесые налеты хлоритов со слабым зеленоватым оттенком, нередко содержащие реликты зеленого хлорита, фактически являются продуктами его дальнейшего разложения. Общая железистость светло-зеленых хлоритов изменяется в пределах 27—30 ат. %. Вторая разность хлоритов определена также рентгеноскопически (табл. 9). Дифрактограммы, снятые на монокристаллах, в основном подтверждают заключения по дебаграммам, выполненным на порошковом материале [6]. По результатам измерений светло-зеленый хлорит по составу близок к группе магнезиальных хлоритов [26], и его предположительная кристаллохимическая формула может быть представлена в виде



По-видимому, включения хлорита этой разности исследовались в работе [52].

**Рентгенограмма порошка включений хлоритов
(с кварцем и мусковитом, обр. 2)**

I/I_1	I_2	$\frac{d_\alpha}{n} (\text{Å})$	$\frac{d_\beta}{n} (\text{Å})$
1	2	3	4
5	5,60	9,93	9,00
1	7,15	(7,78)	7,06
5	7,95	7,03	(6,35)
4	12,00	4,66	4,22
7	13,25	4,23	(3,83)
7	15,30	(3,67)	3,33
2	16,00	3,51	3,19
10	16,90	3,33	(3,02)
11	19,80	2,86	2,59
2	21,30	2,667	2,418
3	21,85	2,603	2,360
5	23,40	2,439	2,211
3	25,15	2,279	2,066
1	25,75	2,230	2,022
1	26,50	(2,171)	1,968
3	27,20	2,119	1,921
—	28,90	(2,004)	1,817
—	29,45	1,970	(1,786)
7	32,40	1,808	(1,639)
2	34,80	(1,697)	1,539
4	35,60	1,664	1,509
8	39,05	1,538	(1,394)
2	39,50	1,523	1,381
1	42,00	1,448	1,312
1	43,10	1,418	1,285
8	44,90	1,372	(1,244)
1P	47,05	(1,323)	1,200
1	48,35	(1,296)	1,175
2	49,00	1,283	(1,164)
3	50,60	1,253	1,137
2	52,10	1,228	1,113
5	54,00	1,197	(1,086)
5	55,30	1,178	(1,068)

1	2	3	4
2	57,40	1,150	1,042
1	58,35	(1,138)	1,032
4	60,30	(1,1151)	1,0111
5	63,75	1,0800	0,9792
—	67,50	1,0484	0,9506
—	68,35	1,0422	0,9449
3	69,45	1,0345	(0,9380)
3	72,50	1,0156	(0,9209)
2	77,90	0,9906	0,8982
2	78,60	0,9881	0,8959

На большом фактическом материале установлена генетическая связь включений хлоритов с включениями биотита на основании постепенного перехода от чистого биотита к его

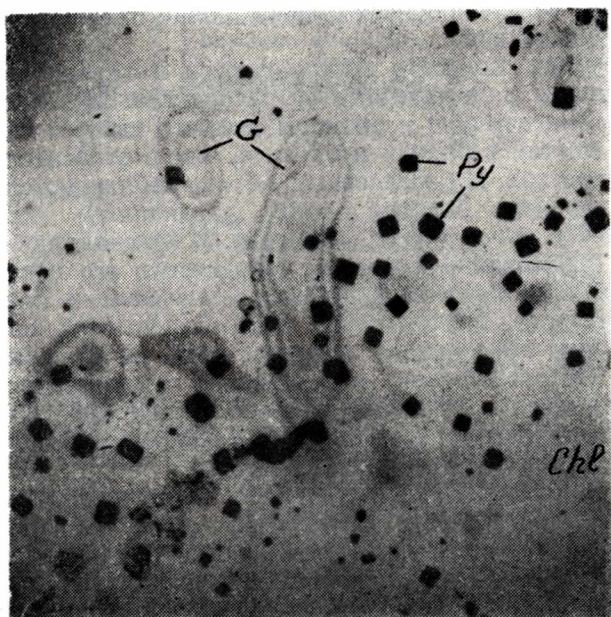


Рис. 35. Включения пирита (Py) в хлорите (Chl) и газа (G). Увел. 60.

хлоритизированной разности и далее к полным псевдоморфозам их по биотиту [61]. Спектры отражения хлоритов этой разности, полученные методом инфракрасной спектроскопии,

говорят об их связи с биотитом, так как имеют общий максимум отражения при $\nu = 1025 \text{ см}^{-1}$.

Нередко в налетах, тонкочешуйчатых агрегатах хлоритов встречаются реликты биотита разного вида, в том числе и содержащего монацит с характерным вокруг него черно-бурым ореолом. Процесс хлоритизации, как известно, при содержании в действовавшем растворе достаточного количества серы, сопровождается выделением сульфидов, поэтому в исследованном мусковите (жила № 183) пирит, редко пирротин, ассоциирует с тонкочешуйчатыми агрегатами, налетами хлоритов (рис. 11, 35).

Форма, размеры и характер расположения включений хлоритов в мусковите (в значительной степени) определяются соответствующими особенностями замещенного биотита. Хлориты, развивающиеся по биотиту, представлены неправильными пленками, листочками, налетами, окрашенными в зеленый цвет, и белыми с зеленоватым оттенком тонкочешуйчатыми агрегатами неясных или «геометрических» очертаний. Распространены псевдоморфозы хлоритов по биотиту в форме ступенчатовидных, шестиугольных листочков, звездчатых, веретеновидных пленок, лейстовидных и полосовидных образований.

Включения хлоритов располагаются в любой части кристаллов слюды в зависимости от распространения биотита; нередко их концентрация и размеры намного выше в сильно расслоенных местах табличек мусковита, чем в относительно плотных его участках. В расслоенных местах наблюдаются главным образом хлориты белесые с едва различимым под микроскопом ($16\times$) зеленоватым оттенком. В кристаллах ельчатого строения образования хлоритов находятся в его центре, среди микровключений биотита и газовых включений и между полосами ельчатости. Относительно часто встречаются концентрически-зональные образования хлоритов (рис. 34 б), кристаллизовавшиеся самостоятельно, в основном в периферической зоне кристаллов слюды. Мусковит жилы IV типа (№ 183) отличается значительным содержанием и большими размерами включений биотита и соответственно хлоритов.

Процесс хлоритизации биотита в изученном мусковите жил III типа (№ 172, 186) развит очень слабо. Но налеты и пленочные образования хлорита встречаются в мусковите каждой из исследованных жил данного месторождения, и наиболее крупные (до $1,5 \times 2,5 \text{ см}^2$) наблюдались в слюде жилы № 172 в ассоциации с реликтовыми включениями биотита. Густо-зеленые таблички хлорита по сингенетическому биотиту установлены чаще в слюде кварц-мусковитового комплекса жилы № 186. По внешним признакам — окраске, форме, распространению в кристалле мусковита, показателям преломления и другим признакам включения хлорита идентичны описанным выше.

В составе исследованных разрезов пегматитовых жил II типа (жилы № 141 а, 152) таблитчатый биотит отсутствует, соответственно в мусковите нет его крупных включений, подобных наблюдавшимся в мусковите жилы № 183. В характеризующей слюде имеются мелкие (2—3 до 5 мм²) сингенетические и эпигенетические листочки и пленки биотита по краю табличек мусковита (рис. 31 б, особенно в жиле № 152), поэтому образовавшиеся по ним хлориты соответственно мелких размеров концентрируются в краевой зоне.

Таблица 10

Появление „ржавых пятен“ по включениям хлоритов в мусковите при термообработке

Номер жилы и ее тип	Номер пробы	Разновидность мусковита (преобладающая)	Количество пластин мусковита в пробе с „ржавыми пятнами“ на полезной площади, %
183 IV	1783	Мусковит кварц-мусковитового комплекса в ассоциации с биотитом	14
	1784		16
	1787		12
183 IV	1801	Мусковит кварц-мусковитового комплекса	22
	1812		22
183 IV	1772	Пегматоидный мусковит	2
	1775		6
	1776		4
	1788		6
152 II	—	Мусковит кварц-мусковитового комплекса	6,5
141 а II	—	Мусковит кварц-мусковитового комплекса	8

При термической обработке мусковита в окислительных условиях по включениям хлоритов образуется «ржавая пятнистость» [61]. Температура, при которой появляются «ржавые пятна», совпадает с температурами эндотермического эффекта термограмм хлоритов: зеленые хлориты обезвоживаются и перестраивают решетку при температурах более низких (480—570°), чем светло-зеленые (640—700°). При окислении происходит обезвоживание бруситового слоя хлоритов, сопровождающееся переходом закисного железа в окисное по схеме $\text{Fe}^{2+} + (\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{O}^{2-} + \text{H}^+$. Атомы водорода удаляются в виде воды (при окислении в воздушной среде) и образуются «ржавые пятна».

По проявлению «ржавой пятнистости» можно судить о распространенности включений хлоритов в мусковите. Так,

в мусковите пегматоидной разновидности жилы № 183 процент пластинок с «ржавыми пятнами» низкий, 2—6% (табл. 10). Следовательно, в нем было мало включений хлоритов. В мусковите кварц-мусковитового комплекса и в мусковите из сростаний с биотитом визуальное установленное высокое содержание включений хлоритов подтвердилось соответствующим количеством пластинок с «ржавой пятнистостью» (12—22%). Тогда как в мусковите кварц-мусковитового комплекса жил II типа

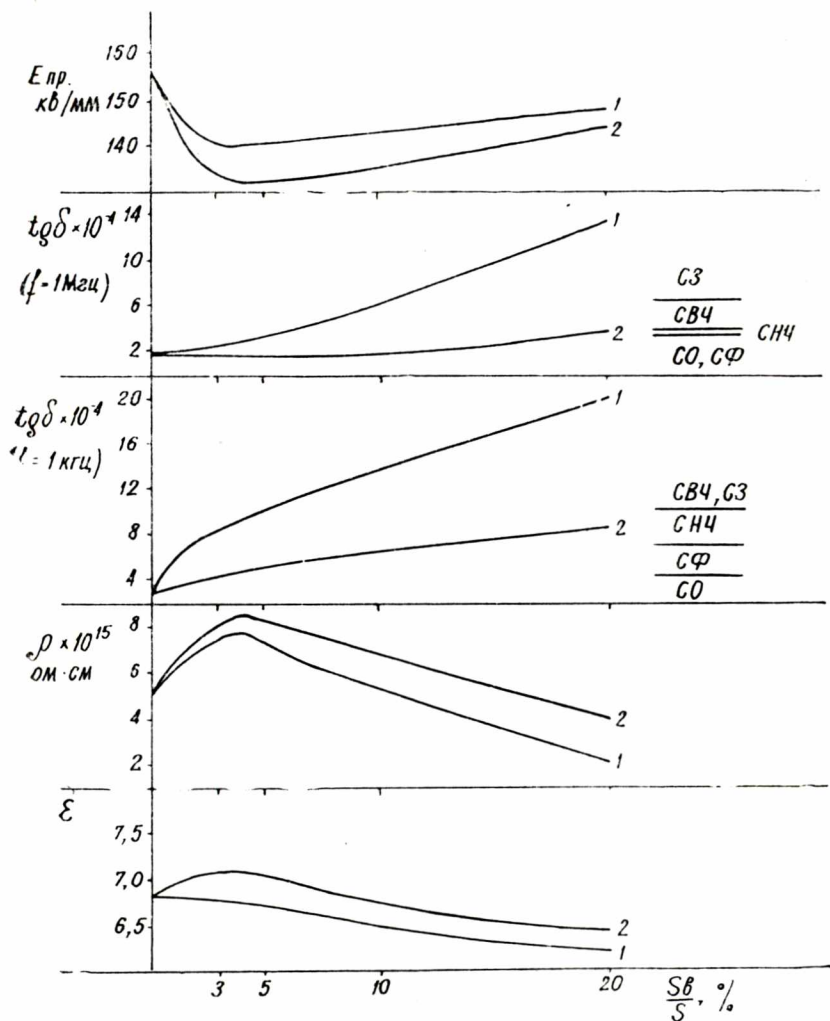


Рис. 36. Влияние включений хлорита магнезиально-железистого (1) и железисто-магнезиального (2) состава на электрические свойства.

№ 152 и 141 а количество включений хлоритов в пределах кристалла не превышает 6—8%.

Влияние включений хлоритов на электрические свойства мусковита. Физические характеристики хлоритов не были изучены из-за небольших размеров листоватых разностей включений и их высокой хрупкости. В связи с различным содержанием железа в хлоритах обеих разностей мусковит с включениями хлоритов обладает различными электрическими свойствами. Диэлектрическая проницаемость ниже у мусковита с включениями зеленого хлорита (рис. 36). Причем с увеличением S_v у мусковита с включениями хлорита ϵ падает. При $S_v=20\%$ диэлектрическая проницаемость больше 6, т. е. выше допустимого для конденсаторной слюды минимума ϵ .

У мусковита с хлоритом стабильность емкости с увеличением t до 70°C близка к значению ТКЕ для мусковита без видимых включений и равна $57 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Хлорит зеленой разности понижает удельное объемное сопротивление мусковита, по сравнению с включениями светло-зеленого хлорита. Тем не менее, ρ мусковита с включениями зеленого хлорита до 20% выше допустимого ГОСТом на конденсаторную слюду минимального значения удельного сопротивления, измеренного перпендикулярно плоскости совершенной спайности. Сплошные хлоритовые включения, по данным А. К. Решетниковой [52], повышают внутреннюю удельную электропроводность слюды на 1—2 порядка.

Тангенс угла диэлектрических потерь, наоборот, выше у мусковита с включениями хлорита зеленой разности, чем у мусковита с аналогичным содержанием включений светло-зеленого хлорита: при частоте 1 кГц потери больше в 1,8—1,9 раза, а при частоте 1 МГц — в 1,2—2,4 раза. Мусковит с включениями светло-зеленого хлорита до 10% может быть использован по электрическим показателям для конденсаторной слюды марок СО, СФ, а до 20% — для марки СНЧ, тогда как мусковит с включениями зеленого хлорита (S_v до 5%) — только для конденсаторной слюды марки СНЧ и (при $S_v > 5\%$) для марки СВЧ (рис. 36). Использование мусковита с хлоритом в качестве конденсаторной слюды в основном будет определяться диэлектрическими потерями при $f=1$ кГц, так как при большой частоте неоднородность внутреннего электрического поля будет сказываться на $\text{tg } \delta$ меньше.

По физическим свойствам мусковит с включениями хлоритов близок к мусковиту с реликтовыми включениями биотита (особенно хлорит зеленой разности) и газа (хлорит светло-зеленой разности). Это может быть объяснено неполным замещением биотита хлоритом, часто чешуйчатым строением агрегатов и присутствием газа среди включений хлоритов [28].

Электрическая прочность мусковита с хлоритом зеленой

разности выше, чем со светло-зеленой разностью хлорита и близка к $E_{\text{пр}}$ мусковита с включениями биотита (рис. 36). Напряжение поверхностного искрения мусковита с хлоритом более высокое, чем мусковита с включениями биотита (рис. 15). С увеличением размера включений хлоритов от 1 до 10 мм, при их изометрической форме U_p изменяется от 9,5 до 8,5 кВ/см. Причем поверхностные включения обеих разностей хлорита уменьшают U_p на 0,2—0,3 кВ/см по сравнению с внутренними. Распределение включений хлоритов в виде цепочки или скопления уменьшают U_p незначительно.

Газовые включения

В карельских слюдах были обнаружены метан, азот, углекислый газ и тяжелые углеводороды [69], характерные для всего исследованного мусковита. В проходящем свете они выглядят как серые полупрозрачные пятна неясных очертаний, микроскопически различающиеся по окраске изохроматических колец (рис. 29 в, 35). В отраженном свете газовые включения характеризуются серебристым цветом, за что получили на предприятиях, обрабатывающих слюду, название «серебристости». Газовые включения наблюдаются в виде пузырьков размером от микроскопических до нескольких миллиметров в поперечнике, которые образуют цепочки, скопления и т. п.

Газовые включения располагаются в разных участках кристаллов мусковита (рис. 12 а, б). Как отмечалось, они пространственно ассоциируют с сингенетическими и новообразованными включениями биотита (рис. 31 а, 32 а, б) или располагаются независимо от включений. Нередко газовые пузырьки обрамляют трещины в мусковите. Повышенное содержание газовых включений в виде гроздевидных и округлых скоплений наблюдается в мусковите кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности из пегматитовой жилы № 183 IV типа.

Из промышленного сырца получено колотых подборов без каких-либо видимых включений от 11,8 до 57,2%, с включениями газа от 4,8 до 17,2%. Выход калиброванных подборов ($d=20-40$ мкм) без включений газа составил от 4,0 до 22,6%, а с включениями — от 2,5 до 20,6%.

Влияние включений газа на электрические свойства мусковита. Из всех изученных включений газовые имеют наибольшее значение удельного объемного сопротивления ($\rho_v=10^{16} \div 10^{20}$ Ом·см) и наиболее низкое значение диэлектрической проницаемости $\epsilon_v=1$. Поэтому включения газа понижают ϵ образца мусковита (рис. 37). По величине ϵ мусковит с газовыми включениями соответствует ГОСТу 7134-64 на конденсаторную слюду. У всех измеренных пластинок с включениями газа до 10% ϵ составила не менее 6,4, а при S_v до 20% проницаемость не снижается ниже 6.

Пластины мусковита с включениями газа до 10% имеют удельное сопротивление в 1,5 раза выше, чем чистые пластины. Экспериментальные данные показывают, что независимо от содержания включений газа, мусковит по значению ρ соответствует маркам СО и СФ конденсаторной слюды.

При частоте 1 кГц включения газа сильно увеличивают

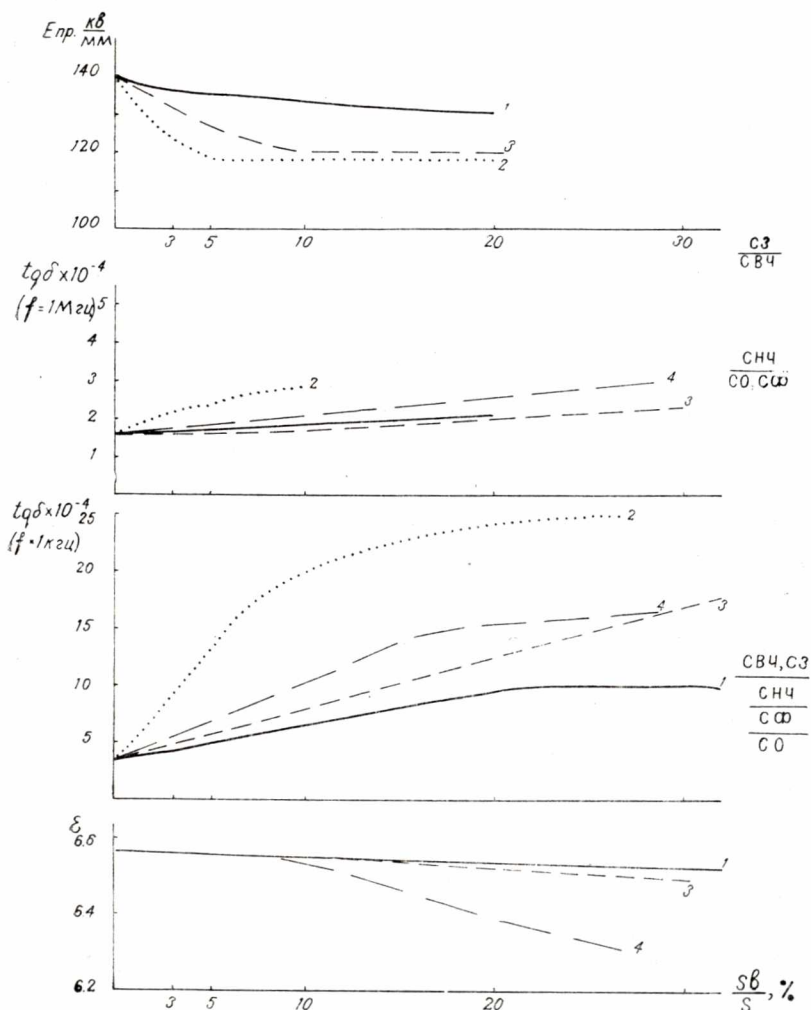


Рис. 37. Влияние распространения включений газа на электрические свойства мусковита:

1 — одиночные, 2 — цепочки, 3 — сыпь, 4 — скопления.

$\text{tg } \delta$. При содержании включений до 3% $\text{tg } \delta$ увеличивается в 1,5 раза по сравнению с чистыми пластинками, а при содержании до 20% — почти в 4 раза. Анализ отдельных измерений показывает, что включения газа снижают выход марок СО и СФ на 13—47%. Средние данные по $\text{tg } \delta$ показывают, что маркам СО и СФ соответствует мусковит с включениями газа до 3%.

Измерение диэлектрических потерь на частоте 1 МГц позволило сказать, что абсолютные значения $\text{tg } \delta$ для пластинок, содержащих до 3% включений газа, увеличиваются в 1,25 раза по сравнению с чистыми той же толщины.

Наличие в мусковите газовых включений создает дополнительные потери в диэлектрике и тем самым снижает выход наиболее качественных марок конденсаторной слюды. При содержании включений газа до 3% выход конденсаторной слюды марок СО и СФ ($\text{tg } \delta$ не превышает $6 \cdot 10^{-4}$) снижается на 19—24%. По средним данным на частоте 1 МГц маркам СО и СФ будут соответствовать пластинки с включениями газа до 30%. С большим содержанием включений мусковит должен быть отнесен к маркам СНЧ и СВЧ. Таким образом, включения газа на частоте 1 МГц мало влияют на $\text{tg } \delta$. Наибольшее влияние на рассматриваемые физические свойства мусковита оказывают пространственно ассоциирующие включения биотита, хлорита и газа.

Кроме влияния общего содержания включений, определяемого занимаемой площадью, на электрические характеристики сказывается распределение включений по пластинке (рис. 37). При расположении газовых включений в виде скоплений и цепочек значения диэлектрических потерь выше, чем при равномерном распределении их по пластинке.

Конденсаторные секции, где основным диэлектриком были пластинки мусковита с газовыми включениями ($d = 30—35$ мкм), выдержали испытание напряжением 2,5 кВ в течение 10 сек. Увеличение напряжения привело к пробое диэлектрика при напряжениях несколько ниже, чем у чистых пластинок мусковита (рис. 37). Электрическая прочность понижается до 120 кВ/мм при содержании до 10% включений газа в виде сыпи — пузырьков, равномерно рассеянных по всей пластинке, в том числе и по краям. Меньшее влияние на $E_{\text{пр}}$ оказывают газовые включения в виде скопления.

Мусковит с включениями газа в виде точек и микро-включений имеет напряжение поверхностного разряда (U_p) ниже, чем мусковит с такими же по размерам магнетитовыми включениями. При включениях газа диаметром 1—1,5 мм U_p больше, чем у мусковита с магнетитом, но меньше, чем у других видов включений тех же размеров. При диаметре 2—3 мм газовых включений U_p мусковита выше, чем у рудных включений, и ниже, чем у нерудных (рис. 15).

Глава III

О РАСПРОСТРАНЕНИИ МУСКОВИТА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СУЛЬФИДОВ, БИОТИТА И ХЛОРИТОВ В ИЗУЧЕННЫХ РАЗРЕЗАХ НЕКОТОРЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ЖИЛ

В процессе изучения распространенности мусковита с включениями, главным образом пирротина и пирита, биотита и хлорита, в ряде пегматитовых жил карельских месторождений было установлено, что состав минеральных включений, их образование и содержание в мусковите связаны со структурно-минералогическими особенностями пегматитовой жилы и пегматитовой породы, непосредственно вмещающей мусковит. Наблюдения показали, что высокое содержание включений пирротина характерно для мусковита пегматитовых жил III и IV типов, залегающих в X—XI горизонтах чупинской свиты месторождения Малиновая Варакка. Прежде всего, это мусковит пегматоидной разновидности и крупнокристаллический мусковит из «бахромы» кварц-мусковитового комплекса, развитые в пегматитовых породах плагиомикроклинового, микроклин-плагиоклазового составов неяснографической, пегматоидной и блоковой структур. Данные пегматитовые породы находятся большей частью вблизи или в непосредственном контакте с кварцевыми блоками центральной и промежуточной зоны жил. Пирротин преобладает также среди включений в слюде крупных гнездовых образований плагиоклаз-кварц-мусковитового состава, расположенных между гигантскими блоками кварца и микроклина в центральной части жилы № 183 IV типа. Эти образования, по аналогии с охарактеризованными А. С. Никаноровым [44], авторы данной работы относят к кварц-мусковитовому комплексу II генерации.

Совершенно иное соотношение пирротина с другими видами включений наблюдается в мусковите пегматитовых пород плагиоклазового состава, причем жил не только II, но и III, IV типов. Например, включения пирротина устанавливаются сравнительно редко даже в пегматоидном мусковите, но плагиоклазовых пород в жилах III, IV типов, пространственно ассоциирующем с блоковым кварцем и нередко в значительной степени деформированном. В жилах II типа в мусковите той же разновидности несколько повышенное содержание пирротина, причем в виде ихтиоглиптовидных пленок, было установ-

лено лишь в отдельных образцах, взятых вблизи или из непосредственного контакта с кварцевой осью жилы (№ 152). На месторождении Тэдино исследования проводились только в жилах III типа (в силу обстоятельств, связанных с разведочными работами), залегающих в мелкозернистых слабо или отчетливо рассланцованных гнейсах V горизонта чупинской свиты. Мусковит кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности, развитый в плагиоклазовых пегматитах указанных жил, содержит редкие мелкие включения сульфидов независимо от пространственной ассоциации с блоковым кварцем и трещиноватости слюды.

В главе II отмечалось, что в мусковите обеих разновидностей исследованных пегматитовых жил распространен пирит в виде самостоятельных пластинчатых включений и пирит предположительно генетически ассоциирующий с пирротинном. Естественно, что пирит последнего вида преимущественно встречается в мусковите, в котором широко развит пирротин. О распространенности такого мусковита уже говорилось. Пирит самостоятельной кристаллизации наблюдается главным образом в мусковите кварц-мусковитового комплекса плагиоклазовых пород жил II, III и IV типов. По содержанию в мусковите данный пирит часто уступает включениям биотита и хлорита даже в однотипных жилах одного месторождения. Например, в жиле № 141-а II типа мусковит с пиритом составлял около 70% от общего числа образцов, в жиле № 152—пирит преобладал лишь в отдельных табличках мусковита. В мусковите кварц-мусковитового комплекса жилы № 154 III типа большей частью встречался пирит, а в мусковите из призальбандовой зоны жилы № 183 IV типа преобладали включения биотита и хлорита. В мусковите жил III типа месторождения Тэдино из включений, в целом довольно редких, пирит, ассоциирующий с пирротинном, более развит в пегматоидном мусковите жил № 172 и 186; пирит самостоятельной кристаллизации в основном устанавливается в мусковите жилы № 180.

Включения биотита наблюдаются в мусковите кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности жил II—IV типов. Мусковиты этих жил отличаются по количественному содержанию включений биотита, разнообразию их форм и происхождению. В частности, для исследованного мусковита кварц-мусковитового комплекса и его «бахромы» пегматитовых жил II типа характерны сингенетические включения биотита, располагающиеся только в краевой зоне кристаллов слюды, перпендикулярно их граням. В разных жилах указанного типа они составляют от 30 до 90—95% от общего числа образцов с включениями. Кроме того, встречаются мелкие скопления звездчатых и веретенновидных включений новообразованного биотита в ассоциации с газовыми включениями, не влияющие на обработку слюды.

В мусковите кварц-мусковитового комплекса и пегматоидной разновидности пегматитовых жил III и особенно IV типов, кроме вышеупомянутых разностей, отмечаются скопления сингенетического биотита с газом, обуславливающие зажимистость мусковита, и реликтовые включения биотита. В мусковите месторождения Тэдино последние распространены незначительно; они часто представлены мелкими листочками биотита с микрозернами радиоактивных минералов. Высокое содержание реликтов биотита разнообразной формы, расположения в кристалле и размеров (чаще крупных), установлено в мусковите плагиоклазового и особенно смешанного состава пегматитов жил IV типа. Как правило, мусковит, насыщенный указанными включениями, находится в генетической ассоциации с лейстовидным или таблитчатым биотитом. В мусковите кварц-мусковитового комплекса без биотита или с его одиночными небольшими табличками, развитого в пегматитах смешанного состава упомянутой жилы, включения биотита распространены наряду с сульфидами, которые часто преобладают. В мусковите кварц-мусковитового комплекса, развитого в плагиоклазовом пегматите призальбандовой зоны жилы IV типа, кроме биотита, содержатся пирит и особенно хлорит.

Включения хлорита присутствуют в мусковите пегматоидной разновидности и в мусковите кварц-мусковитового комплекса всех исследованных пегматитовых жил. Косвенным признаком на значительное содержание включений хлорита в мусковите может служить распространенность лейстовидного и таблитчатого биотита в пегматитовой жиле и пространственная связь с ним данного мусковита. Например, в изученных разрезах пегматитовых жил II типа (№ 141 а, 152) крупнокристаллический биотит не встречался. Соответственно в мусковите распространены только мелкие включения биотита, сингенетические и эпигенетические, сосредоточенные в краевой зоне кристаллов слюды. Хлорит развит по указанным включениям биотита. В мусковите обеих разновидностей пегматитовых жил III типа (№ 172, 186), распространенном в породах существенно плагиоклазового состава, изредка с биотитом, хлорит встречается редко. Из просмотренных 190 образцов мусковит с хлоритом составил 12%. В пегматоидном мусковите — это налеты и пленки по редким сингенетическим и реликтовым включениям биотита и выделения типа сферолитов. В мусковите кварц-мусковитового комплекса, кроме пленок и налетов, наблюдались мелкие таблички густо-зеленого хлорита в краевой зоне кристаллов. Биотит, как известно, широко развит в пегматитовых жилах IV типа. Эти жилы являются отражением полного, законченного процесса пегматитообразования мусковитовой формации [22], в последние этапы которого интенсивно происходили гидротермальные процессы, способствовавшие хлоритизации биотита [47]. Соответственно мусковит этой

жилы, генетически или пространственно ассоциирующий с биотитом, содержит значительное количество включений хлорита, располагающихся по всей площади кристаллов слюды (табл. 10).

В мусковите изученных пегматитов, согласно представленному материалу, с усложнением структурно-минерального комплекса пород, слагающих жилы (от II к IV типу), залегающих в X—XI горизонтах чупинской свиты, увеличивается разнообразие и количество включений. Однако низкое содержание включений наблюдалось в мусковите пегматитовых жил III типа, залегающих в V горизонте чупинской свиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании мусковита для различных видов изделий необходимо учитывать все особенности включений в нем разных типов жил. Включения преимущественно распространены в дефектных участках кристаллов. На использование мусковита включения в полосах ельчатости, по периферии кристалла и трещинам, в чешуйчатых зажимах не влияют. Они удаляются вместе с дефектами при обработке. Минеральные включения, характеризующиеся сильно уплощенным обликом и наблюдаемые по спайности на участках, не затронутых указанными дефектами, могут быть отнесены к числу допустимых для некоторых видов слюдяных изделий. Включения на этих участках не препятствуют расщеплению мусковита.

Многообразие форм кристаллизации и распространения включений в мусковите оказывает существенное влияние на электрические свойства вмещающей их слюды. Критерием оценки качества мусковита являются диэлектрическая проницаемость, температурный коэффициент емкости, удельное объемное сопротивление, диэлектрические потери, электрическая прочность, напряжение разряда по поверхности и др. Более чувствительным из физических параметров к наличию неоднородностей в диэлектрике при существующих методах их измерения и оборудования является тангенс угла диэлектрических потерь.

Из включений наименьшее влияние на диэлектрические потери оказывают силикаты, наибольшее — рудные, особенно пирротин. Существенно влияет на электрические показатели мусковита относительная величина включений, особенно вдоль электрического поля.

Мусковит с пленочными включениями (ихтиоглиптовидного пирротина, дендритовидного магнетита, хлорита железисто-магнезиального состава и сингенетического биотита) имеет тангенс угла диэлектрических потерь ниже, чем мусковит с тонкопластинчатыми включениями (изометричной формы

Виды включений, их форма и распространение в пластинках мус
требованиям стандарта для конденсаторной

Виды включений	Площадь S_B , %	Частота		
		СО	СФ	СНЧ
		$\text{tg } \delta$ до $4 \cdot 10^{-4}$ [18]	$\text{tg } \delta$ до $7 \cdot 10^{-4}$	$\text{tg } \delta$ до $1 \cdot 10^{-3}$
1	2	3	4	5
Пирротин и пирит	2	Не допускаются	1. Ихтиоглиптовидные в виде сыпи и скоплений 2. Поверхностные	1. Изометричной формы в виде скоплений 2. Линейной формы, одиночные
	3	Не допускаются	1. Ихтиоглиптовидные в виде сыпи 2. Поверхностные	1. Ихтиоглиптовидные в виде скоплений 2. Изометричной формы скопления
	5	Не допускаются	То же	1. Ихтиоглиптовидной формы скопления
	10	Не допускаются	То же	То же
Магнетит	20	Не допускаются	То же	То же
	2	1. Снежинковидные (точечных размеров) спорадические, в виде сыпи	1. Снежинковидные спорадические, цепочки и в виде сыпи 2. Дендриты линейные, одиночные	
	3	То же	То же	
	5	То же	1. Снежинковидные спорадически распространенные, сыпь, цепочки	1. Дендритовидные линейно-вытянутые
	10	То же	То же	Не допускаются

ковита месторождений Малиновая Варакка и Тэдино, отвечающие
слюды различных марок (по средним показателям)

I МГц	Частота I МГц		
	СВЧ и СЗ $\text{tg } \delta$ не нормируется	СО, СФ $\text{tg } \delta$ до $3,3 \cdot 10^{-4}$	СНЧ $\text{tg } \delta$ до $4 \cdot 10^{-4}$
	6	7	8
1. Изометричной формы одиночные и спорадические	1. Все формы включений и все виды их распределений	1. Все формы и виды распределений	
1. Изометричной формы одиночные и спорадические 2. Линейные	1. Все, кроме поверхностных	1. То же	
То же	1. Все, кроме поверхностных и линейных	1. Все, кроме поверхностных	
То же	1. Ихтиоглиптовидные в виде сыпи и скоплений 2. Изометричной формы спорадические и скопления	1. Ихтиоглиптовидные в виде сыпи и скоплений 2. Изометричные спорадические и скопления	Линейные и изометрические одиночные
То же	1. Снежинковидные всех видов распределений	Не допускаются	Не допускаются
	То же	То же	1. Дендритовидные линейно-вытянутые
	То же	То же	Не допускаются Не допускаются
1. Дендритовидные линейно-вытянутые	То же		Не допускаются

1	2	3	4	5
Гидроокислы железа	3	Не допускаются	1. В ассоциации с газом 2. Поверхностные	
	5	Не допускаются	То же	
	10	Не допускаются	То же	
Биотит	20	Не допускаются	То же	
	2—3	Не допускаются	Сингенетические	Реликтовые (с цирконом)
	5	Не допускаются	То же	Сингенетические
	10	Не допускаются	То же	Не допускаются
	20	Не допускаются	То же	То же
Хлориты	2	Магнезиальный		
	3	Не допускаются	Магнезиальный	
	5	Не допускаются	То же	Магнезиально-железистый
	10	Не допускаются	То же	Не допускаются
Газ	20	Не допускаются	Не допускаются	Магнезиальный
	2	Спорадические	1. Одиночные 2. Скопления	
	3	Спорадические	То же	
	5	Спорадические	1. Спорадические 2. Одиночные 3. Скопления	
	10	Не допускаются	1. Одиночные 2. Сыпь	
	20	Не допускаются	1. Сыпь	1. Одиночные 2. Скопления

сульфидов, реликтового биотита и хлорита магнезиально-железистого состава, табл. 11).

Площадь, занятая включениями, расположенными поперек электрического поля, тоже влияет на электрические свойства мусковита. С увеличением суммарной площади включений диэлектрические потери растут, особенно при неоднородностях

6	7	8	9
	1. В ассоциации с газом 2. Поверхностные То же Нет	1. В ассоциации с газом 2. Поверхностные То же	
	Сингенетические и реликтовые		
Реликтовые (с цирконом)	То же		
Не допускаются	То же		
То же	Не допускаются	Реликтовые	
	1. Магнезиальный 2. Магнезиально-железистый То же		
	1. Магнезиальный	Магнезиально-железистый	
Магнезиально-железистый	1. Магнезиальный	Не допускаются	Магнезиально-железистый
То же	Не допускаются	Магнезиальный	Не допускаются
Цепочки	Все виды, кроме скоплений		Скопления
Цепочки	То же		То же
То же	То же	Скопления	Не допускаются
1. Скопления 2. Цепочки	Все виды		Не допускаются
Цепочки	Все виды, кроме цепочек	Цепочки	Не допускаются

внутреннего поля, созданных биотитом с радиоактивным минералом, хлоритом железистого состава, газом, сульфидами. Диэлектрическая проницаемость мусковита с рудными включениями и биотитом (с радиоактивным минералом) увеличивается, а с хлоритом и газом падает. Удельное объемное сопротивление, напряжение поверхностного разряда и электрическая

прочность мусковита со всеми видами включений снижается с ростом занимаемой площади. Исключение составляет мусковит с газом, у которого сопротивление растет. Наибольшие изменения диэлектрической проницаемости и сопротивления происходят при содержании включений до 5%, а температурного коэффициента емкости — до 10%.

Концентрация включений влияет на электрические свойства мусковита. Мусковит со спорадическим расположением включений и в виде сыпи имеет лучшие показатели по сравнению с расположением их в виде скоплений, цепочек, линий.

Определение электрических показателей по усредненным данным [17, 20] приводит к снижению выхода изделий. Например, по значению диэлектрических потерь марке СО конденсаторной слюды соответствуют 55% испытанных пластинок мусковита с содержанием сульфидов до 3%, тогда как по среднему показателю они не допускаются в этой марке слюды.

Кристаллы мусковита с небольшим содержанием включений, которые распространены в жилах II и III типов месторождений Малиновая Варакка и Тэдино, могут быть использованы в основном для производства высококачественных изделий в радиотехнике и электротехнике. Мусковит с высоким содержанием включений, особенно рудных, развитый в жилах IV типа, имеет низкие электрические показатели и может быть использован для менее качественных марок конденсаторной и для производства щипаной слюды. Применение мусковита, электрические показатели которого варьируют довольно широко, лучше вести дифференцированно с учетом условий работы будущих изделий. Необходимо продолжить исследования причин неоднородности мусковита и точной классификации слюды по качеству.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянкина Е. Д., Гурьева Э. Я., Игнатова М. Д. и др. 1958. Генезис и типизация промышленного мусковита. М., Изд. АН СССР.
2. Беннинг П. 1960. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций. М.—Л., Госэнергоиздат.
3. Берч Фр., Шерер Дж., Спайсер Г. 1949. Справочник для геологов по физическим константам. М., ИЛ.
4. Бетехтин А. Г. 1961. Курс минералогии. М., Госгеолтехиздат.
5. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А. 1965. Теория диэлектриков. М.—Л., «Энергия».
6. Браун Г. 1965. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. М., «Мир».
7. Водопьянов К. А., Ворожцова И. Г. 1958. Диэлектрические потери в слюде мусковите с минералогическими включениями лимонита и биотита на высокой частоте.—Изв. АН СССР. Сер. физ., т. 22, № 3.
8. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. 1966. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М., «Высшая школа».
9. Воробьев А. А., Завадовская Е. К. 1958. Электрическая прочность твердых диэлектриков. М., Гостехиздат.
10. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. 1963. Некоторые закономерности электрического пробоя твердых диэлектриков—В сб.: Доклады IV Межвуз. конференции по пробоя диэлектриков и полупроводников. Томск.
11. Ворожцова И. Г. 1962. К вопросу о природе диэлектрических потерь в слюде.—Изв. вузов. Физика, № 1.
12. Гольдман И. М., Лейзерзон М. С. 1958. К вопросу об использовании слюды в конденсаторах.—Тр. ВНИИасбестцемента, вып. 9.
13. ГОСТ 18096—72. Детали слюдяные для электронных приборов.
14. ГОСТ 11155—65. Конденсаторы слюдяные типов КСГ, СГМ, КСО.
15. ГОСТ 6433—65. Материалы электронизоляционные твердые.
16. ГОСТ 10698—71. Слюда. Виды и общие технические требования.
17. ГОСТ 10918—64. Слюда конденсаторная. Методы испытаний.
18. ГОСТ 7134—64. Слюда конденсаторная. Технические требования.
19. ГОСТ 3028—68. Слюда щипаная.
20. ГОСТ 10917—68. Слюда щипаная. Методы испытания.
21. Григорьева Т. Н., Архипенко Д. К., Кебезинская К. Б. и др. 1970. Об изменениях в структуре хлоритов различного состава при температурной обработке.—В сб.: Исследование структурных особенностей минералов современными физико-химическими методами. Новосибирск, «Наука».
22. Гродницкий Л. Л., Полн А. К. 1975. Пегматиты северной Карелии и их ореолы. Петрозаводск, «Карелия».
23. Губкин А. Н. 1958. Поверхностный пробой поликристаллических

- диэлектриков с разной диэлектрической проницаемостью.— ЖТФ. Сер. А, т. 28, вып. 10.
24. Гурьева Э. Я. 1959. О включениях минералов железа в мусковите.— Тр. минерал. музея, вып. 10.
25. Дубенская Н. В., Дубенский А. М. 1971. К вопросу установления степени пятнистости при различной толщине кристаллов слюды.— В сб.: вопр. геол. поисков и разведки мусковитоносных пегматитов. М., «Недра».
26. Иванова В. П. 1949. Хлориты.— Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, вып. 120.
27. Казарновский Д. М., Тареев Б. М. 1963. Испытания электроизоляционных материалов. М.—Л., Госэнергоиздат.
28. Карелина И. Н. 1974. Влияние включений хлорита и биотита в мусковите на его электрические свойства.— Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР, вып. 29.
29. Карпихин В. В. 1964. Технология производства слюдяных и стеклоэмалевых конденсаторов. М.—Л., «Энергия».
30. Карский Б. Е., Луговской Г. П. 1956. Методика изучения и характеристика включений в мусковите Мамско-Чуйского р-на.— Тр. ВНИИасбестцемента, вып. 5.
31. Кепежинская К. Б. 1965. Статистический анализ хлоритов и их парагенетические типы. М., «Наука».
32. Корбанова В. И. 1962. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат.
33. Корицкий Ю. В. 1968. Электротехнические материалы. М., «Энергия».
34. Лазаренко Е. К. 1971. Курс минералогии. М., «Высшая школа».
35. Лашев Е. К. 1948. Слюда. Ч. 1. М., Промстройиздат.
36. Лейзерзон М. С., Гуров С. А. 1958. К вопросу о характеристиках слюд с природными дефектами в виде пятен и их промышленном использовании.— Тр. ВНИИасбестцемента, вып. 9.
37. Лейзерзон М. С., Феофилова О. Л. 1958. К вопросу о возможности повышения сортности деловой слюды методами термохимической очистки.— Тр. ВНИИасбестцемента, вып. 9.
38. Мальцев А. В. 1956. Об электрической прочности слюды с минеральными включениями в плоскости спайности.— Учен. зап. Вологодского пед. ин-та. Сер. физико-хим., т. 17.
39. Мальцев А. В. 1958. О влиянии некоторых видов минеральных включений и краевых расслоений на свойства конденсаторной слюды.— Учен. зап. Вологодского пед. ин-та. Сер. физико-мат., т. 23.
40. Мальцев А. В. 1958. Влияние сильных электрических полей на электропроводность чистого мусковита и мусковита с минеральными включениями в плоскостях спайности.— Тр. Всесоюз. конфер. по физике диэлектриков. М., Изд. АН СССР.
41. Мецик М. С. 1967. Физика расщепления слюд. Восточно-Сибирское книжное изд., Иркутск.
42. Михайлов М. М. 1929. Электрические свойства русских слюд.— Вест. теоретической и экспериментальной электротехники, т. 5.
43. Некрасов М. М. 1964. Неоднородные диэлектрики (Конспект лекций для студентов спец. «Диэлектрики и полупроводники»). Ч. 1. Киев.
44. Никаноров А. С. 1959. К вопросу о генерациях и типах промышленного мусковита.— Тр. ВСЕГЕИ, № 9.
45. Никаноров А. С. 1961. О некоторых дефектах кристаллов мусковита.— Записки ВМО. Изд. АН СССР, сер. 2, ч. 90, вып. 4. М.—Л.
46. Никаноров А. С. 1964. Взаимоотношения между биотитом и мусковитом в слюдоносных пегматитах.— Тр. ВСЕГЕИ. Сер. новая, т. 108.
47. Никитин В. Д. 1952. Процессы перекристаллизации и метасоматоза в слюдяных и керамических пегматитах.— Зап. Ленингр. горного ин-та, т. 27, вып. 2.
48. Никитин В. Д. 1953. Особенности образования кристаллов мусковита в пегматитовых жилах.— Зап. Ленингр. горного ин-та, т. 29, вып. 2.

49. Поваренных А. С. 1960. О диэлектрической проницаемости минералов.— Тр. Криворожского горнорудного ин-та, вып. 8.
50. Ревнов Б. И. 1968. О взаимоотношениях биотита и мусковита в пегматитовых жилах.— Материалы по минералогии Кольского полуострова. Вып. 6. Л., «Наука».
51. Ренне В. Т. 1969. Электрические конденсаторы. М.—Л., Госэнергоиздат.
52. Решетникова А. К. 1971. Изучение хлоритовых включений в слюде (мусковите) и их влияние на качество электровакуумной слюды.— Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР. Вып. 7.
53. Рожкова Е. В., Проскуровский Л. В. 1957. Определение диэлектрической проницаемости минералов.— В кн.: Современные методы минералогического исследования горных пород, руд и минералов. М., Госгеолтехиздат.
54. Сафронова Г. П. 1960. О зональном мусковите из северокарельских пегматитов.— Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР, вып. 31.
55. Сафронова Г. П., Эйгирд Р. П. 1969. К диагностике рудных включений в мусковите.— Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР, вып. 4.
56. Семенов А. С. 1948. Влияние структуры на удельное сопротивление агрегатов.— Материалы ВСЕГЕИ. Геофизика, сб. 12.
57. Сканави Г. И. 1956. Релаксационная диэлектрическая поляризация и внутреннее поле в твердых диэлектриках.— Изв. Томск. политехн. ин-та, т. 91.
58. Сканави Г. И. 1960. Современное представление о пробое диэлектриков.— Электричество, № 2.
59. Сканави Г. И. 1949. Физика диэлектриков. М.—Л., Гостехиздат.
60. Сканави Г. И. 1958. Физика диэлектриков. М., Физматгиз.
61. Скрипко С. Н. 1971. О «ржавой» пятнистости в мусковите некоторых пегматитов северной Карелии.— Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР, вып. 7.
62. Сулоев А. И., Самойлова Е. И. 1940. Изучение включений в слюдах в связи с их качественной характеристикой.— Тр. ВНИИМСа вып. 157.
63. Тархов А. Г. 1948. О сопротивлении (ρ) и диэлектрической постоянной (ϵ) горных пород в переменных электрических полях.— Материалы ВСЕГЕИ. Геофизика, сб. 12.
64. Толвинская А. В., Михайлов М. М. 1940. Влияние пятнистости на электрические свойства слюды (мусковит).— Изв. электропром, № 4.
65. Федосеев Г. П. 1973. Пятна в мусковите.— Тр. ГИПРОиниаметаллурода, вып. 6.
66. Федосеев Г. П. 1965. Новая проблема применения слюды в радиолампах.— Тр. ГИПРОиниаметаллурода, вып. 1.
67. Франц В. 1961. Пробой диэлектриков. М., ИЛ.
68. Фрелих Г. 1960. Теория диэлектриков. М., ИЛ.
69. Хитаров Д. Н. 1965. Изучение состава и других особенностей газозо-жидких включений в минералах на современном этапе.— В сб.: Минеральные микровключения. М., «Наука».
70. Чуенков В. А. 1956. К теории нарушения электрической прочности твердых диэлектриков.— Тр. ФИАН, т. 8.
71. Шуркин К. А., Горлов Н. В., Салье М. Е. и др. 1962. Беломорский комплекс северной Карелии и юго-запада Кольского полуострова.— Тр. АН СССР, вып. 14.
72. Эпштейн С. Л. 1971. Измерение характеристик конденсаторов. Л., «Энергия».
73. Эстерле О. В. 1972. Измерение электропроводности минералов.— В сб.: Новое в методике минералогических исследований. Алма-Ата.
74. Hoadley Y. W. 1960. Mica deposit of Canada.— Economic geology, series 19.
75. Indian Standard IS:1174—1957. Definition of mica terms.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава I. Зависимость электрических свойств мусковита от физических особенностей минералов-включений	7
Физические и химические свойства минералов-включений	7
Электрические свойства мусковита с включениями	10
Диэлектрическая проницаемость	10
Удельное электрическое сопротивление	13
Диэлектрические потери	15
Электрическая прочность	16
Напряжение поверхностного разряда	20
Глава II. Диагностика минералов-включений, расположение в мусковите и влияние их на электрические свойства	22
Методика подготовки образцов и проведение испытаний	22
Сульфиды и персульфиды железа	25
Пирротин	25
Пирит	33
Оксиды железа	41
Магнетит	41
Гематит	50
Гидроокислы железа	51
Силикаты	53
Биотит	53
Хлориты	63
Газовые включения	72
Глава III. О распространении мусковита с включениями сульфидов, биотита и хлоритов в изученных разрезах некоторых пегматитовых жил	75
Закключение	79
Литература	85

ОСНОВНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МУСКОВИТЕ И ВЛИЯНИЕ ИХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Утверждено к печати Ученым советом
Института геологии Карельского филиала АН СССР

Редактор Г. В. Козлова. Технический редактор Э. С. Иванова. Корректор Л. Ф. Суханова

Сдано в набор 18/III 1976 г. Подписано к печати 7/X 1976 г. Е—06062. Бумага 60×90¹/₁₆. № 1. 5,5 усл. печ. л., 4,78 уч.-изд. л. Изд. № 39. Тираж 600 экз. Заказ 494. Цена 48 коп. Карельский филиал АН СССР. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11. Сортавальская книжная типография. Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР. Сортавала, ул. Карельская, 42